

Comunicação  
Técnica

363

Propriedades de Engenharia  
do Licor Negro Sulfato de  
*Eucalyptus spp*

Rosely Maria Viegas Assumpção  
Alberto Ferreira Lima  
Song Won Park  
Maria Celina Santana Jordão  
Luiz Motohissa Yojo

São Paulo, 1985

**IPT**

Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
do Estado de São Paulo

Comunicação  
Técnica

363

Propriedades de Engenharia  
do Licor Negro Sulfato de  
*Eucalyptus spp*

Rosely Maria Viegas Assumpção  
Alberto Ferreira Lima  
Song Won Park  
Maria Celina Santana Jordão  
Luiz Motohissa Yojo

São Paulo, 1985

**IPT**

Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
do Estado de São Paulo

ROSELY MARIA VIEGAS ASSUMPÇÃO: Engenheira Química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1963). Doutora pelo Instituto de Química da USP (1973). Coordenadora, atualmente na Cia. Suzano de Papel e Celulose.

*Área de atuação:* Processo de fabricação de celulose e papel.

ALBERTO FERREIRA LIMA: Engenheiro Químico pela Escola Politécnica da USP (1974). Mestre em Engenharia Química pela Escola Politécnica da USP (1981). Pesquisador Chefe da Seção de Engenharia de Processos e Subprodutos do Centro Técnico em Celulose e Papel do IPT.

*Área de atuação:* Análise e desenvolvimento de processos da indústria de celulose e papel.

SONG WON PARK: Engenheiro Químico pela Escola Politécnica da USP (1980). Engenheiro Assistente da Seção de Engenharia de Processos e Subprodutos do Centro Técnico em Celulose e Papel do IPT.

*Área de atuação:* Análise e controle industrial de processos de celulose e papel.

MARIA CELINA SANTANA JORDÃO: Engenheira Química pela Escola Politécnica da USP (1969). Mestre em Engenharia Química pela Escola Politécnica da USP (1977). Pesquisadora da Seção de Engenharia de Processos e Subprodutos do Centro Técnico em Celulose e Papel do IPT.

*Área de atuação:* Extrativos e subprodutos da madeira.

LUIZ MOTOHISSA YOJO: Engenheiro Químico pela Escola Politécnica da USP (1980). Engenheiro Assistente da Seção de Engenharia de Processos e Subprodutos do Centro Técnico em Celulose e Papel do IPT.

*Área de atuação:* Processo de fabricação de celulose e papel.

## SUMÁRIO

RESUMO/ABSTRACT	VII
INTRODUÇÃO	I
PROPRIEDADES DE ENGENHARIA	2
Análise química	2
Poder calorífico e análise elemental	3
Massa específica	3
Calor específico	3
Tensão superficial	4
Estrutura do ponto de ebulição	5
Viscosidade	7
CONCLUSÃO	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17

Os autores agradecem o suporte financeiro dado pela Secretaria de Tecnologia Industrial do Ministério da Indústria e do Comércio, às Indústrias Brasileiras que colaboraram no fornecimento de amostras e informações, aos técnicos do Centro Técnico em Celulose e Papel e de outras Divisões do IPT pelas análises realizadas.

## SUMÁRIO

---

<i>RESUMO/ABSTRACT</i> .....	VII
INTRODUÇÃO .....	1
PROPRIEDADES DE ENGENHARIA .....	2
Análise química .....	2
Poder calorífico e análise elementar .....	2
Massa específica .....	3
Calor específico .....	3
Tensão superficial .....	4
Elevação do ponto de ebulição .....	5
Viscosidade .....	7
CONCLUSÃO .....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	11
LISTA DE SÍMBOLOS .....	13
LISTA DE FIGURAS .....	15
LISTA DE TABELAS .....	17

## INTRODUÇÃO

A atividade de muitas regiões produtoras de celulose tanto da indústria química quanto da indústria de papel, tem proporcionado a produção de grandes quantidades de licor negro sulfato de eucalipto. Este licor negro sulfato de eucalipto é produzido em grandes quantidades por meio de processos de recuperação de fibras e de fibras de madeira, sendo utilizado para a produção de celulose e de outros produtos de papel. Este licor negro sulfato de eucalipto apresenta características físicas e químicas que influenciam diretamente o desempenho de processos de recuperação de fibras e de fibras de madeira, sendo necessário conhecer as propriedades físicas e químicas deste licor negro sulfato de eucalipto para a otimização dos processos de recuperação de fibras e de fibras de madeira.

## RESUMO

Neste trabalho determinou-se a influência da temperatura e do teor de sólidos nas características físicas de licor negro sulfato de eucalipto, aplicada a cálculos de engenharia. As características estudadas foram: viscosidade, massa específica, elevação do ponto de ebulição, tensão superficial e calor específico. Foram estabelecidas correlações matemáticas das propriedades com a temperatura e com o teor de sólidos, de modo a prever valores para diferentes pontos do sistema como nos de evaporadores. São, também, apresentados valores médios de composição química e de poder calorífico das amostras industriais de licor negro.

Este licor negro sulfato de eucalipto é produzido em grandes quantidades por meio de processos de recuperação de fibras e de fibras de madeira, sendo utilizado para a produção de celulose e de outros produtos de papel. Este licor negro sulfato de eucalipto apresenta características físicas e químicas que influenciam diretamente o desempenho de processos de recuperação de fibras e de fibras de madeira, sendo necessário conhecer as propriedades físicas e químicas deste licor negro sulfato de eucalipto para a otimização dos processos de recuperação de fibras e de fibras de madeira.

## ABSTRACT

This paper presents the physical properties of sulphate black liquor of eucalyptus pulping related with the temperature and the dry solid content. The experimental data were collected for the viscosity, density, boiling point rising, surface tension and specific heat. Empirical equations were constructed for prediction of these physical properties under different temperatures and dry solid contents. Furthermore, mean chemical composition and low heating values of many industrial liquor are presented. These engineering data are usefull in the analysis and design of the pulping and recovery area of the pulping process.

## INTRODUÇÃO

A atividade de muitos engenheiros nos diversos ramos da indústria química envolve:

- **operação de plantas industriais** - supervisão da rotina de produção e melhoria de eficiência da planta por meio de variações no processo em uso;
- **projeto de plantas industriais** - determinação de certas características gerais e dimensões de equipamentos;
- **desenvolvimento de processo** - procura de novas vias de processamento, equipamentos e condições adequadas de processo.

O desenvolvimento destas atividades está estreitamente ligado à avaliação e análise das várias operações unitárias da indústria química que, por sua vez, se relacionam diretamente com o comportamento dos fluidos e materiais nos equipamentos.

Uma das áreas mais importantes da indústria de pasta kraft é a recuperação de reagentes, que se inicia com a concentração e queima do licor negro originado das etapas de polpação e lavagem da pasta celulósica. Para a análise destas operações há necessidade de se recorrer aos princípios e equações de transporte de fluidos e de calor que dependem de certas propriedades do licor negro, entre as quais se destacam: massa específica, viscosidade, calor específico, tensão superficial, condutividade térmica, elevação do ponto de ebulição e poder calorífico.

A falta de dados confiáveis ou a adoção de valores advindos do processamento de matérias-primas estrangeiras pode conduzir, quando do projeto básico de uma unidade, ao sub ou superdimensionamento, com reflexos negativos para o sucesso do empreendimento e para a otimização das operações, tanto no aspecto de material quanto de energia. Mesmo em instalações já existentes, a necessidade premente de racionalizar o consumo de energia fica seriamente comprometida pela carência de dados desta natureza. A operação contínua e eficiente de trocadores de calor, evaporadores, fornalha de recuperação, assim como o desempenho de equipamentos de oxidação do licor, o dimensionamento de medidores etc., dependem das características do licor negro.

Estas características, comumente denominadas propriedades ou dados de engenharia, dependem da sua natureza química, da temperatura e da concentração dos constituintes orgânicos do licor.

O licor negro é formado de uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos. Os compostos orgânicos, principalmente na forma de sais de sódio, incluem lignina e polissacarídeos de baixo peso molecular, derivados de açúcares, resinas e ácidos graxos. Os compostos inorgânicos são constituídos, principalmente, por sulfeto, sulfato e carbonato de sódio, e outros sais em pequenas quantidades.

A natureza química, concentração e comportamento dos componentes estão associados à matéria-prima fibrosa e às condições de cozimento e de processamento utilizadas.

Levantamentos das propriedades de engenharia foram realizados, inicialmente, nas décadas de 40 a 60, nos países escandinavos e Estados Unidos. Recentemente, este assunto tem sido retomado, tanto nesses países como em outros, particularmente devido ao advento dos sistemas de controle automático de processos que requerem dados mais precisos e confiáveis para garantia de um bom ajuste e desempenho. As características do licor negro de cozimento sulfato de eucaliptos brasileiros eram praticamente desconhecidas, principalmente, as inter-relações entre algumas das principais propriedades de engenharia com o teor de sólidos e a temperatura.

O Centro Técnico em Celulose e Papel - CTCP, contratado pela Secretaria de Tecnologia Industrial - STI, do Ministério da Indústria e do Comércio - MIC, dentro das atividades do "Subprograma de Apoio Tecnológico em Conservação de Energia no Setor de Papel e Celulose", resultante do Protocolo firmado entre o Governo e a Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose - ANFPC, desenvolveu em 1982/1983 um trabalho para determinar a influência da temperatura e do teor de sólidos sobre algumas características físicas do licor negro sulfato de eucalipto proveniente de cinco unidades industriais. As propriedades estudadas foram: viscosidade, massa específica, elevação do ponto de ebulição, tensão superficial e calor específico. Foram, tam-

bém, determinadas as composições químicas e o poder calorífico das amostras industriais.

Nesta publicação são apresentados os principais resultados do trabalho já citado. Informações adicionais sobre os valores dos dados de engenharia para cada uma das fábricas podem ser encontradas em ASSUMPCÃO (1) e IPT/CTCP (2)

## PROPRIEDADES DE ENGENHARIA

As amostras do licor negro foram coletadas em cinco fábricas que processam madeira de eucalipto, pelo processo sulfato, em duas épocas diferentes. A produção total de pasta celulósica dessas fábricas correspondia, em 1982, segundo ANFPC, a 46% da produção nacional de pasta química e 64% de pasta celulósica de folhosas, o que dá uma idéia da representatividade dos materiais amostrados. Os procedimentos e as metodologias empregados podem ser encontrados em ASSUMPCÃO (1) e nas referências ali citadas.

### Análise química

O licor negro contém quase todas as subs-

tâncias orgânicas, removidas durante o cozimento da madeira, e os compostos inorgânicos como:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaOH}$  e  $\text{NaCl}$ .

As diferenças entre os valores refletem as variações inerentes à operação das instalações industriais, razão pela qual não foram apresentados os valores médios entre as fábricas (Tabela 1).

### Poder calorífico e análise elementar

O poder calorífico define-se como quantidade de calor liberada por unidade de massa de um combustível, quando queimado completamente, levando-se os produtos da combustão, por resfriamento, à temperatura de referência. O poder calorífico superior é aquele que considera toda a água no estado líquido. A unidade no SI, é MJ/kg, sendo os valores comumente referidos a 25°C.

O poder calorífico é um valor necessário para efetuar cálculos relativos à caldeira de recuperação. Os valores dependem da composição química, da relação orgânicos/inorgânicos e do teor de sólidos do licor negro. A Tabela 2 ilustra os valores encontrados para as diferentes fábricas.

TABELA 1 – Composição química do material inorgânico de licor negro sulfato de *Eucalyptus spp* (% em massa sobre sólidos secos)

Fábrica	Cloretos (como $\text{NaCl}$ )	Sulfatos (como $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	Sulfetos (como $\text{Na}_2\text{S}$ )	Carbonatos (como $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	Tiosulfatos (como $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )	Sódio elementar total	Enxofre elementar total	Cinza sulfatada
1 A	0,98	3,36	3,82	7,49	—	18,15	—	52,76
1 B	—	—	—	—	—	—	—	—
1 C	1,01	9,71	2,71	7,41	—	18,38	6,3	—
2 A	1,53	1,17	5,41	5,78	1,96	18,42	—	62,11
2 B	1,53	1,37	1,39	5,47	3,45	18,01	—	—
2 C	1,78	4,51	0,68	6,24	3,18	19,82	4,5	—
3 A	1,62	2,99	3,06	7,57	—	19,04	3,2	62,28
3 B	—	—	—	—	—	—	—	—
3 C	—	—	—	—	—	—	—	—
4 A	1,48	2,19	6,22	8,77	—	18,09	—	64,71
4 B	—	—	—	—	—	—	—	—
4 C	1,55	4,35	5,80	9,45	—	19,35	6,6	—
5 A	1,42	3,17	3,51	9,68	2,10	16,99	—	65,60
5 B	1,01	4,02	traços	10,13	2,24	16,37	5,1	—
5 C	—	—	—	—	—	—	—	—

Nota: A — antes da oxidação e/ou da adição de sulfato de sódio de reposição; B — após oxidação; C — após adição do sulfato de sódio de reposição.

TABELA 2 – Poder calorífico superior de licor negro e análise elemental dos sólidos

Fábrica	Teor de sólidos (% em massa)	Poder calorífico superior (MJ/kg)	Sólidos (% em massa)					
			C	H	O*	N	S	Na
1	66,4	7,8	31,4	3,1	39,9	1,3	6,3	18,0
2	62,0	8,4	35,0	3,5	36,4	1,9	4,5	18,7
3	59,5	9,2	33,2	3,6	39,0	0,7	3,2	20,3
4	59,3	8,3	33,5	3,2	36,5	**	6,6	20,2
5	60,5	7,9	32,8	3,0	44,1	**	5,1	15,0

(\*) Calculado por diferença.

(\*\*) Não detectado.

**Massa específica**

A massa específica do licor negro é de indiscutível utilidade e importância para o dimensionamento de, praticamente, todos os equipamentos usados industrialmente, na área de recuperação de reagentes e de calor.

Em muitas instalações, o controle da evaporação é feito através de medição de massa específica do licor negro. Assim, são úteis correlações entre esta propriedade e o teor de sólidos do licor em várias temperaturas.

Para a massa específica do licor negro com teor de sólidos inferior a 45%, tem-se a correlação:

$$\rho = 0,734 \cdot 10^{-2} \cdot T_s - 0,185 \cdot 10^{-4} \cdot T_s \cdot \theta + 0,972$$

Na Figura 1, são plotadas as isotermas de variação da massa específica com o teor de sólidos dos licores. A Figura 2 constitui um nomograma, que permite determinar a massa específica do licor a partir do teor de sólidos em determinada temperatura, sendo válido para o licor em estado líquido.

**Calor específico**

Entende-se por calor específico, o calor necessário para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa de material. A unidade, no CGS, é [ cal/(g · °C) ] e no SI [ J/(kg · °C) ].

O calor específico é um dado importante para fazer balanço de energia e calcular a difusividade térmica do licor negro.

Seu valor depende da temperatura e do teor de sólidos, e se calcula por equação empírica do tipo:

$$C_p(\theta) = C_{ps}(\theta) \cdot \frac{T_s}{100} + C_{pH_2O}(\theta) \cdot (1 - \frac{T_s}{100})$$

A Figura 3 apresenta a variação do calor específico em relação ao teor de sólidos.

$$\rho = 0,734 \cdot 10^{-2} \cdot T_s - 0,185 \cdot 10^{-4} \cdot T_s \cdot \theta + 0,972$$

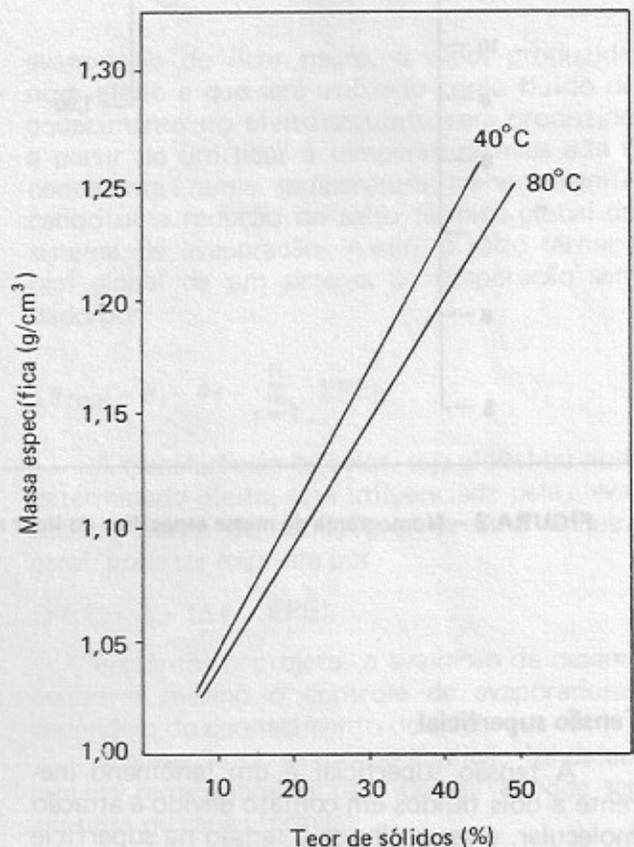


FIGURA 1 – Massa específica X teor de sólidos

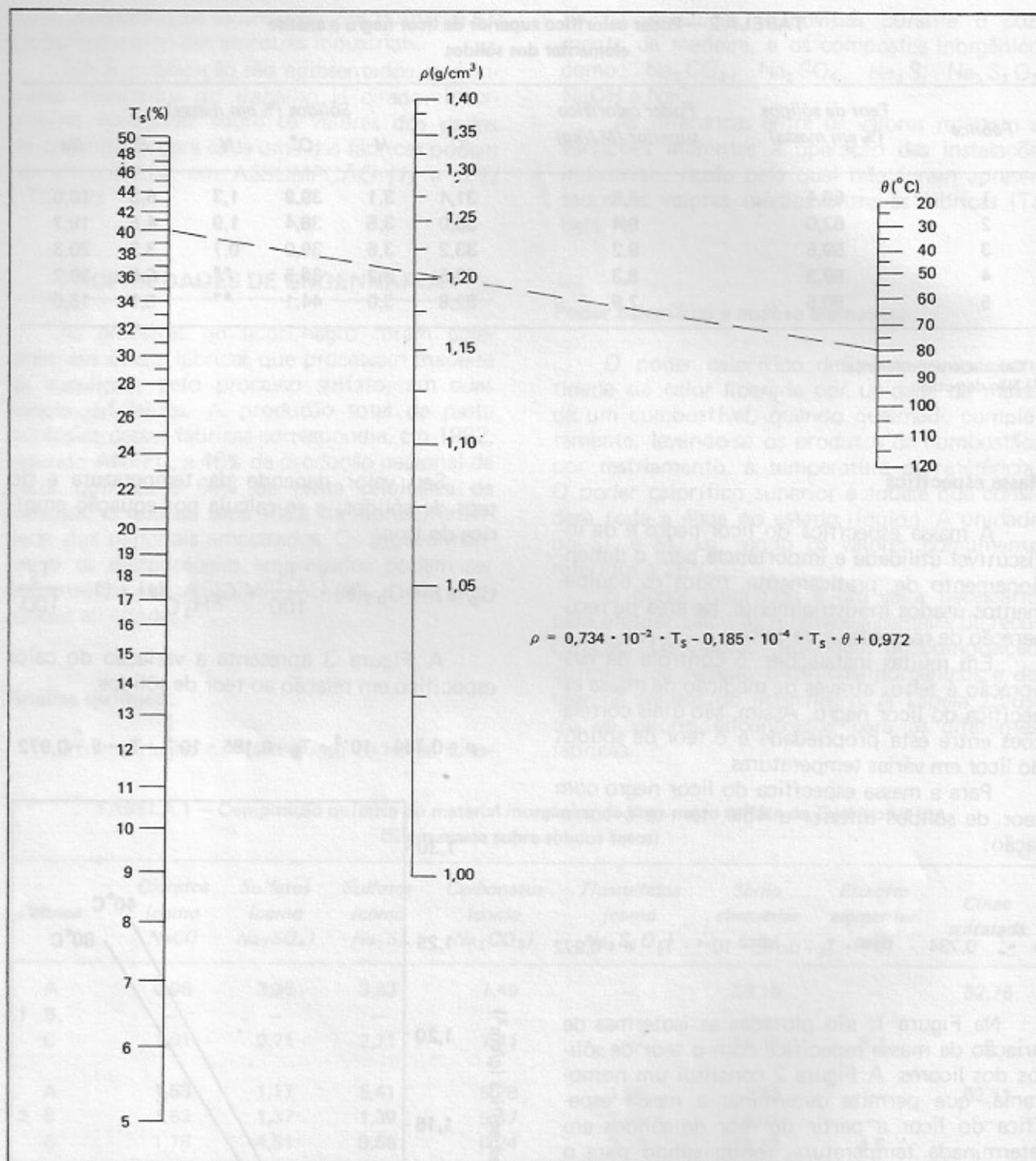


FIGURA 2 – Nomograma da massa específica do licor negro kraft ( $\rho$ ) X teor de sólidos ( $T_s$ ) e X temperatura ( $\theta$ )

### Tensão superficial

A tensão superficial é um fenômeno inerente a dois fluidos em contato devido à atração molecular, e assemelha-se à tensão na superfície de separação. A unidade usual é dyn/cm no CGS e no SI é dada em N/m.

A tensão superficial é uma propriedade cujo conhecimento é necessário, por exemplo, para cálculo do sistema de evaporação do licor negro. Nas indústrias de celulose, seus valores variam numa ampla faixa devido ao uso de diferentes antiespumantes, e também devido à he-

$$C_p(\theta) = C_{ps}(\theta) \cdot T_s/100 + C_{pH_2O}(\theta) \cdot (1 - T_s/100)$$

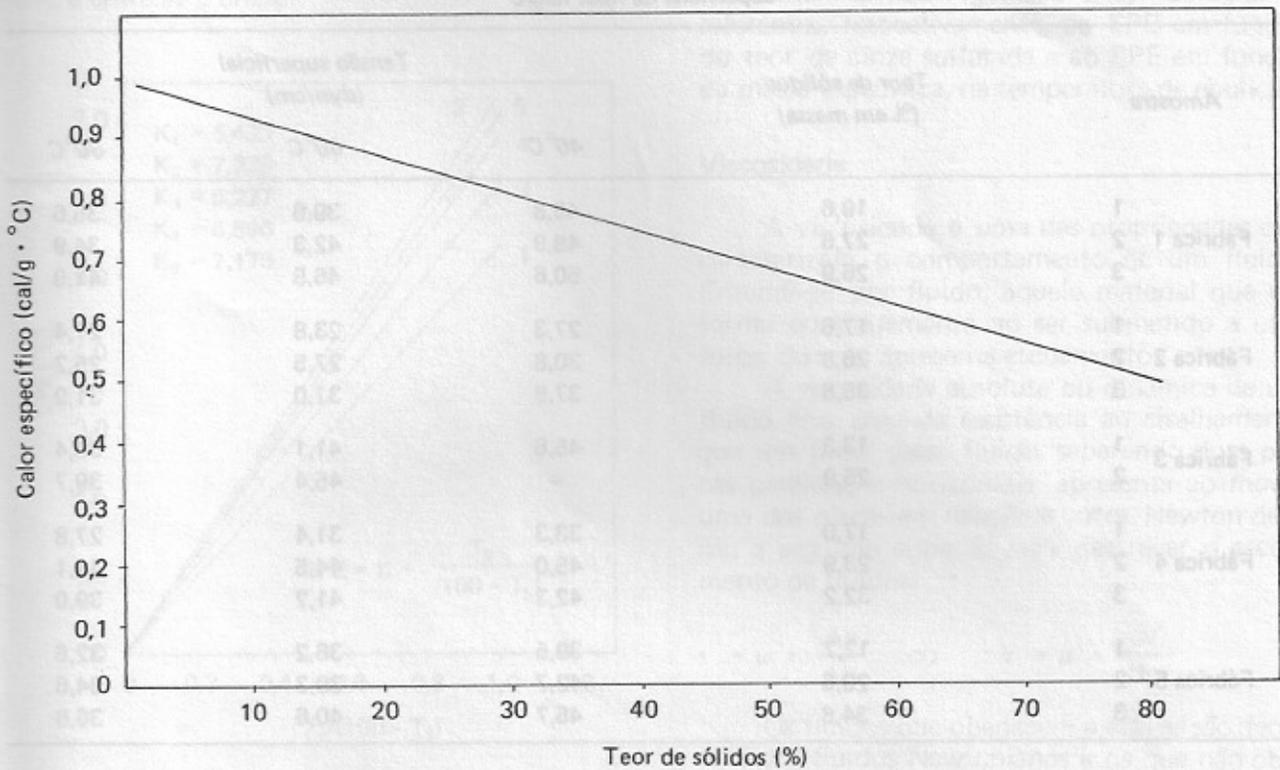


FIGURA 3 – Calor específico X teor de sólidos

terogeneidade do material. A Tabela 3 e a Figura 4 apresentam os valores e a faixa de variação, respectivamente, da tensão superficial do licor negro com relação à temperatura. Genericamente, a tensão superficial aumenta com o teor de sólidos e diminui com crescente temperatura.

**Elevação do ponto de ebulição**

Ponto de ebulição é a temperatura na qual um líquido ferve num ambiente a uma determinada pressão. Neste ponto, a pressão do vapor é igual a do ambiente. Assim, para um líquido puro a uma determinada pressão, o ponto de ebulição é igual à temperatura de saturação e de condensação do vapor.

Quando se adiciona um soluto a um líquido puro, aumenta a temperatura de ebulição da solução na mesma pressão. A diferença entre os pontos de ebulição da solução e do solvente puro tem o nome de elevação do ponto de ebulição (EPE).

É conhecido que as soluções salinas aquosas apresentam ponto de ebulição superior ao da água pura nas mesmas condições. Durante a

evaporação do licor negro, o vapor produzido num efeito e que será utilizado como fluido de aquecimento no efeito seguinte, será produzido a partir de um licor à temperatura mais alta e condensará numa temperatura menor, significando uma redução no salto térmico global do sistema de evaporação. Assim, o salto térmico real global de um sistema de evaporação será dado por:

$$\Delta \theta_{real} = \theta_i - \theta_f - \sum_{j=1}^n EPE_j$$

A transferência de calor, seja global ou num determinado efeito, será influenciada pela elevação do ponto de ebulição e, de uma maneira geral, pode ser expressa por:

$$Q = U \cdot A \cdot (\Delta \theta - EPE)$$

Portanto, o projeto, a avaliação de desempenho e mesmo o controle de evaporadores dependem do conhecimento do EPE.

A elevação do ponto de ebulição foi determinada num aparelho tipo Cottrell e pode ser expressa de várias formas:

$$EPE = K \cdot \frac{T_s}{100 - T_s} \tag{i}$$

TABELA 3 – Influência da temperatura e do teor de sólidos na tensão superficial de licor negro

Amostra	Teor de sólidos (% em massa)	Tensão superficial (dyn/cm)		
		40°C	60°C	80°C
Fábrica 1	1	19,6	45,8	39,6
	2	27,6	48,9	42,3
	3	26,9	50,6	46,5
Fábrica 2	1	17,6	27,3	23,8
	2	26,8	30,8	27,5
	3	35,6	37,8	31,0
Fábrica 3	1	13,3	45,6	41,1
	2	25,9	—	45,4
Fábrica 4	1	17,0	33,3	31,4
	2	23,9	45,0	44,5
	3	32,2	42,3	41,2
Fábrica 5	1	12,7	39,5	36,2
	2	20,6	42,7	39,3
	3	34,8	45,7	40,6

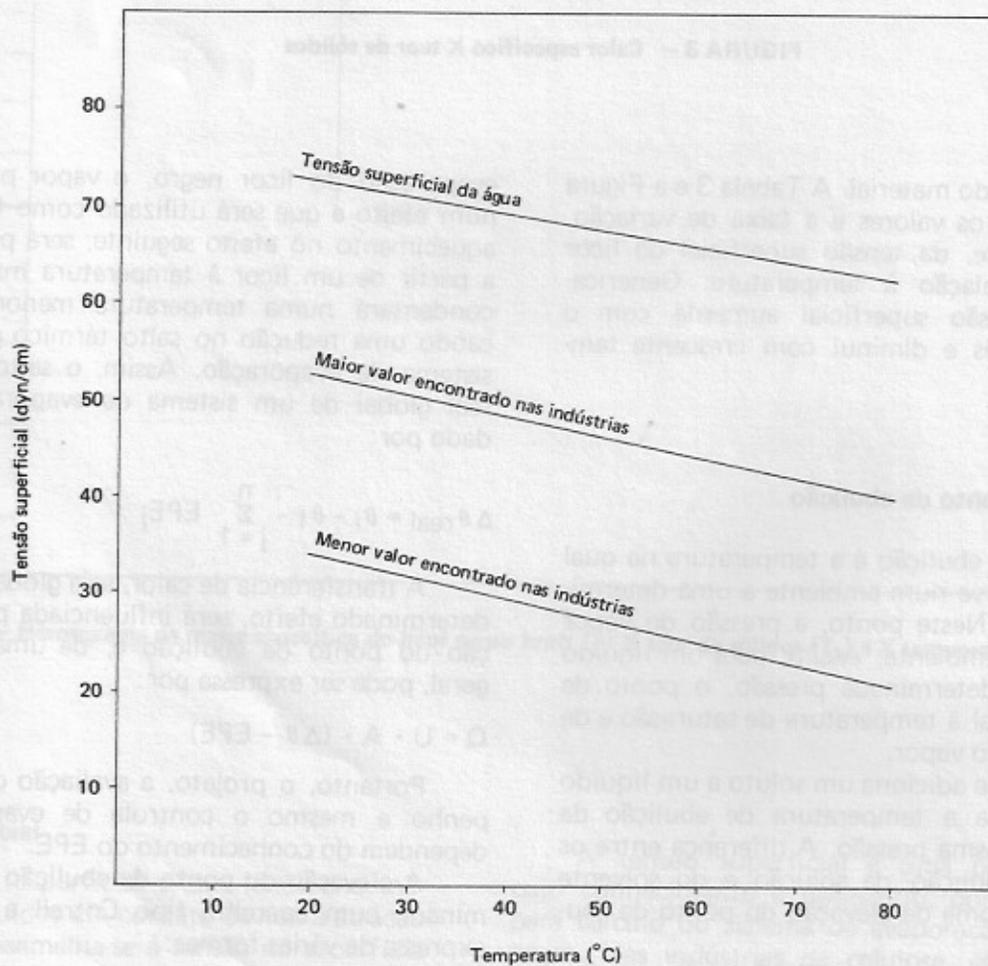


FIGURA 4 – Faixa de variação de tensão superficial de licores negros com teores de sólidos entre 13 - 35%

Conforme indicado na Figura 5, o fator K difere entre as fábricas.

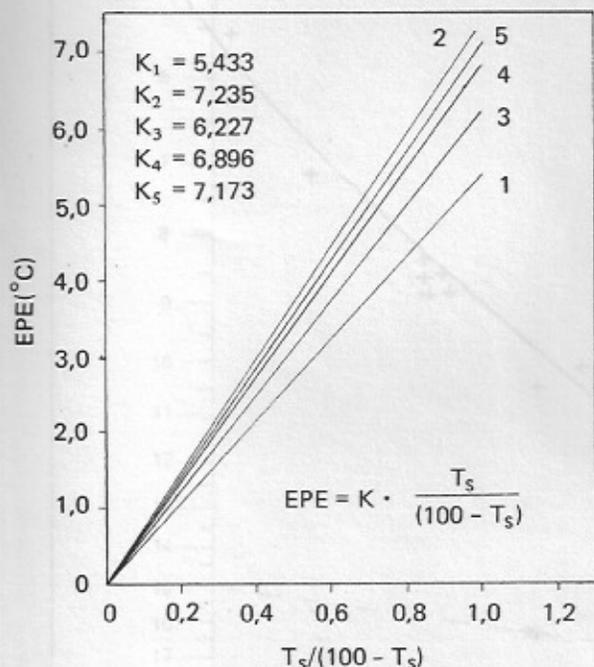


FIGURA 5 – Elevação do ponto de ebulição X teor de sólidos para as diferentes fábricas

O teor dos compostos inorgânicos do licor negro influi no EPE, porém, a determinação exata deste teor, pela análise química, é bastante difícil. Considerando que a medida do teor de cinza sulfatada está relacionada com o conteúdo de inorgânicos, obteve-se uma equação que correlaciona EPE e teor de cinza sulfatada:

$$EPE = 0,0493 \cdot (C_{SS})^{1,4} \quad (ii)$$

Para estabelecer esta correlação usou-se os valores de todas as fábricas e obteve-se um bom ajuste, conforme se pode observar na Figura 6. Mas, esta correlação serve somente para licores com cinza sulfatada na faixa de 60-65% sobre os sólidos secos. Para licores com valores inferiores de cinza sulfatada, essa equação não se aplica.

Outra correlação importante é entre a elevação do ponto de ebulição e a massa específica do licor negro, utilizada em alguns sistemas de controle de evaporadores.

A correlação formulada para o conjunto de fábricas, com valores de cinza sulfatada na faixa de 60-65% sobre os sólidos, foi:

$$EPE = 31,458 \cdot (\rho_{te} - 0,958)^{1,55} \quad (iii)$$

Na Figura 7 tem-se a representação gráfica da equação acima, bem como os valores experimentais obtidos.

Para facilitar o uso das equações citadas, apresentam-se nas Figuras 8 e 9, nomogramas referentes, respectivamente, ao EPE em função do teor de cinza sulfatada e ao EPE em função da massa específica, na temperatura de ebulição.

### Viscosidade

A viscosidade é uma das propriedades que caracterizam o comportamento de um fluido. Entende-se por fluido, aquele material que deforma continuamente ao ser submetido a uma força, ou seja, apresenta escoamento.

A viscosidade absoluta ou dinâmica de um fluido é o grau de resistência ao cisalhamento que um filme desse fluido, separando duas placas paralelas e horizontais, apresenta ao mover uma das placas em relação à outra. Newton definiu a seguinte equação para descrever o escoamento de fluidos:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad \text{ou} \quad \tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy}$$

Os fluidos que obedecem a essa lei são denominados fluidos Newtonianos e os que não obedecem, fluidos Não-Newtonianos.

Independente do tipo de fluido, a viscosidade absoluta ou dinâmica de uma substância fluida pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$\text{viscosidade absoluta} = \frac{\text{força} \cdot \text{espessura do filme}}{\text{área da placa} \cdot \text{velocidade}}$$

A unidade usual da viscosidade dinâmica é poise, que é do CGS, sendo que 1 poise equivale a 1 g/cm · s. No SI, a unidade é kg/m · s.

A viscosidade cinemática é a razão entre a viscosidade absoluta e a massa específica do fluido, a uma determinada temperatura. A unidade usual é stokes, do CGS, e 1 stokes equivale a 1 cm<sup>2</sup>/s. A viscosidade cinemática tem uma importância especial na viscosimetria, pois os instrumentos mais utilizados medem esta viscosidade, representada pelo tempo que um determinado volume de fluido gasta para passar por um orifício calibrado.

A viscosidade influi no diferencial de pressão, nas velocidades de transferências de calor e massa, e nas velocidades de mistura. Seu valor deve ser conhecido para cálculo dos números de Reynolds, Nusselt e Prandtl, largamente utilizados em cálculos de engenharia. É um fator importante no cálculo de tubulações, na seleção de bombas, na estimativa de coeficientes de transferência de calor e influi, inclusive, no custo de energia para bombeamento de licores. Altas viscosidades favorecem o surgimento de incrus-

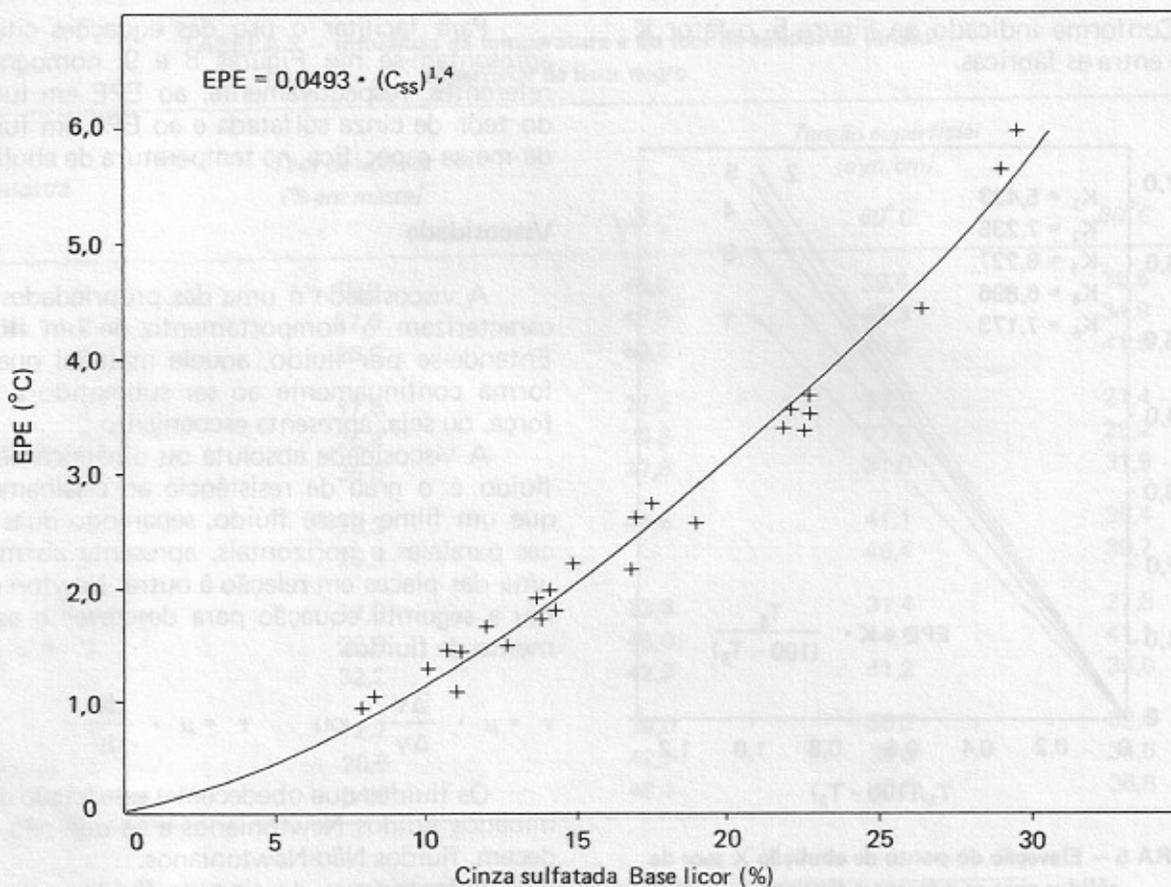


FIGURA 6 – Elevação do ponto de ebulição X teor de cinza sulfatada (% base licor)

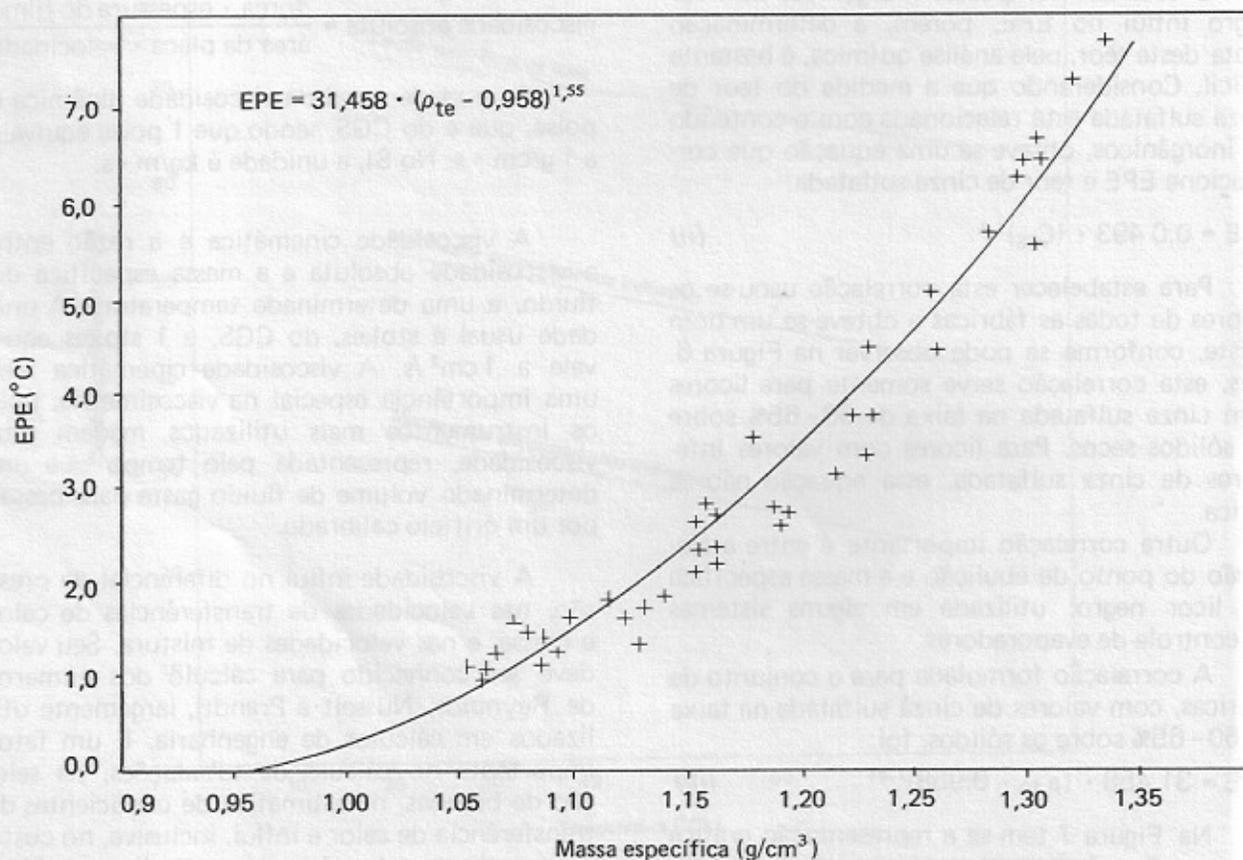
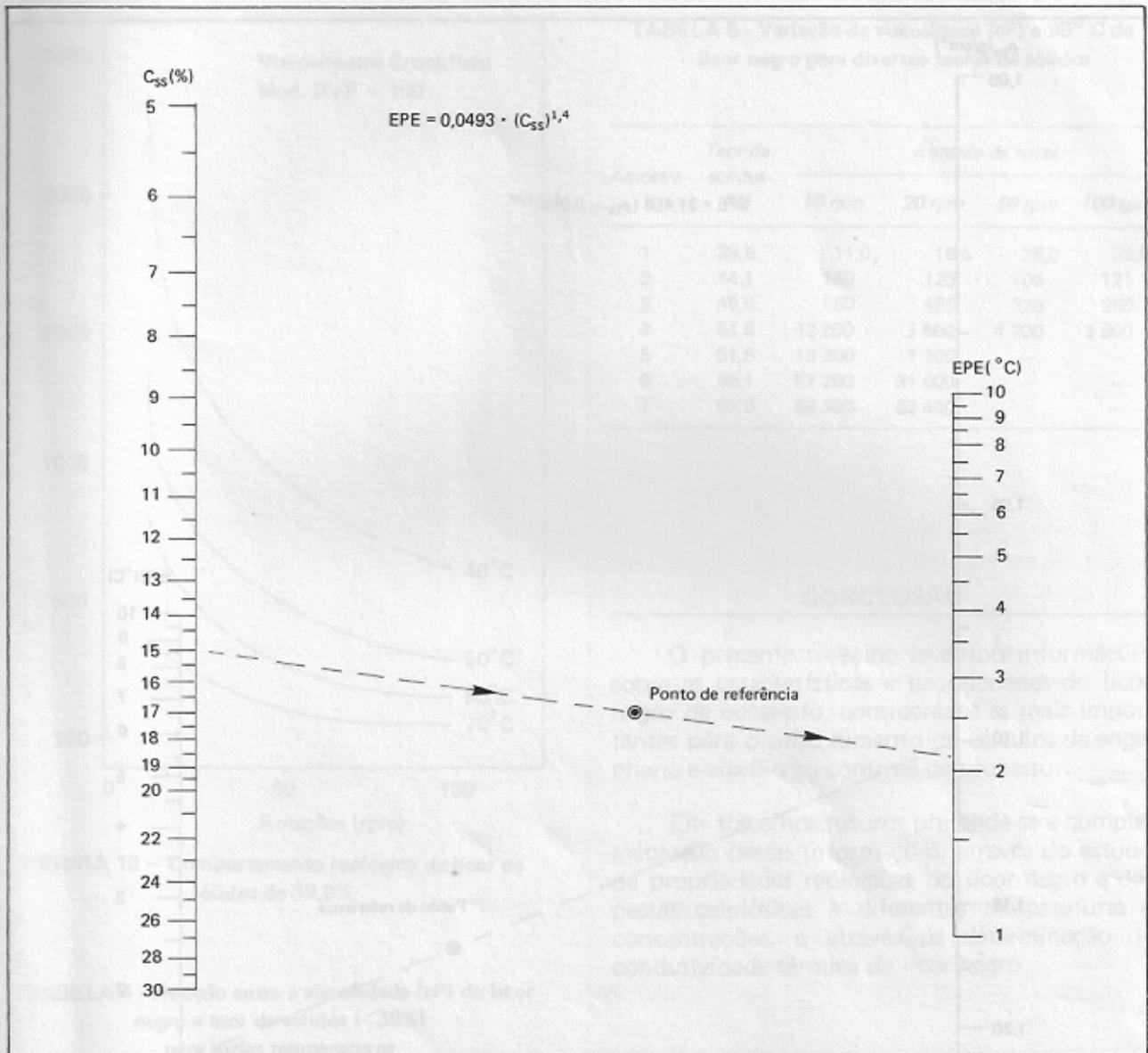


FIGURA 7 – Elevação do ponto de ebulição X massa específica



Obs.:  $C_{55}$  é expressa como  $Na_2SO_4$  no licor. Se a cinza sulfatada estiver expressa como NaOH e em porcentagem de sólidos totais, multiplicar por um fator  $f = (\text{sólidos totais}/56,3)$ , antes de usar o nomograma.

**FIGURA 8 – Nomograma da elevação do ponto de ebulição (EPE) do licor negro kraft X teores de cinza sulfatada (% sobre massa total de licor) ( $C_{55}$ )**

tações nos evaporadores com reflexos negativos na economia de energia do sistema, além de impedir, em alguns casos, a utilização de sistemas indiretos de evaporação até concentrações superiores a 60 – 65% de sólidos.

A viscosidade, bem como a tensão superficial, influi na atomização do licor negro na fornalha da caldeira de recuperação.

A viscosidade do licor negro aumenta com o teor de sólidos e diminui com a temperatura. O licor de eucalipto se caracteriza por apresentar um aumento brusco de viscosidade, para teor de sólidos em torno de 35%. Até este ponto, o licor de eucalipto apresenta comportamento próximo ao fluido Newtoniano.

Neste caso, a influência da temperatura sobre a viscosidade pode ser expressa pela equação do tipo:

$$\log \mu = \frac{A}{(\theta + 273)^3} + B$$

O licor com sólidos superior a 35% apresenta um acentuado comportamento Não-Newtoniano. No estudo do comportamento reológico, usou-se um viscosímetro Brookfield, com determinações em diferentes temperaturas. Este aparelho apresenta a viscosidade em função da

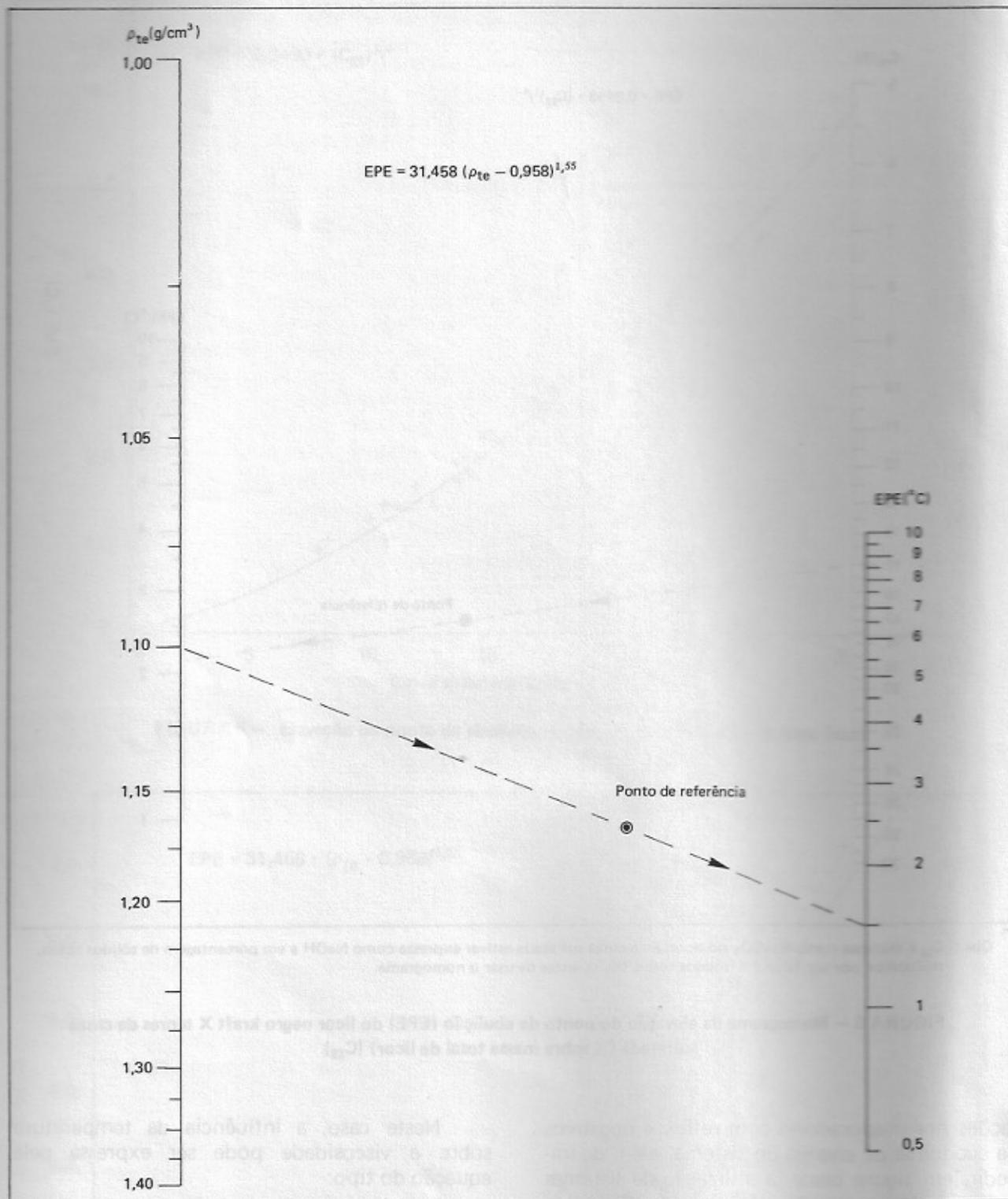


FIGURA 9 – Nomograma da elevação do ponto de ebulição do licor negro kraft (EPE) X massa específica na temperatura de ebulição ( $\rho_{te}$ )

rotação da haste que representa o gradiente de velocidade. A título ilustrativo, apresenta-se, na Figura 10, o comportamento de um licor com 39,8% de sólidos. Observa-se que, com o aumento da temperatura, o comportamento deste licor

aproxima-se do fluido Newtoniano. Na Tabela 4 apresenta-se a viscosidade de vários licores para teor de sólidos menor que 35%. Na Tabela 5 apresenta-se o comportamento reológico de licores para teor de sólidos maior que 35%.

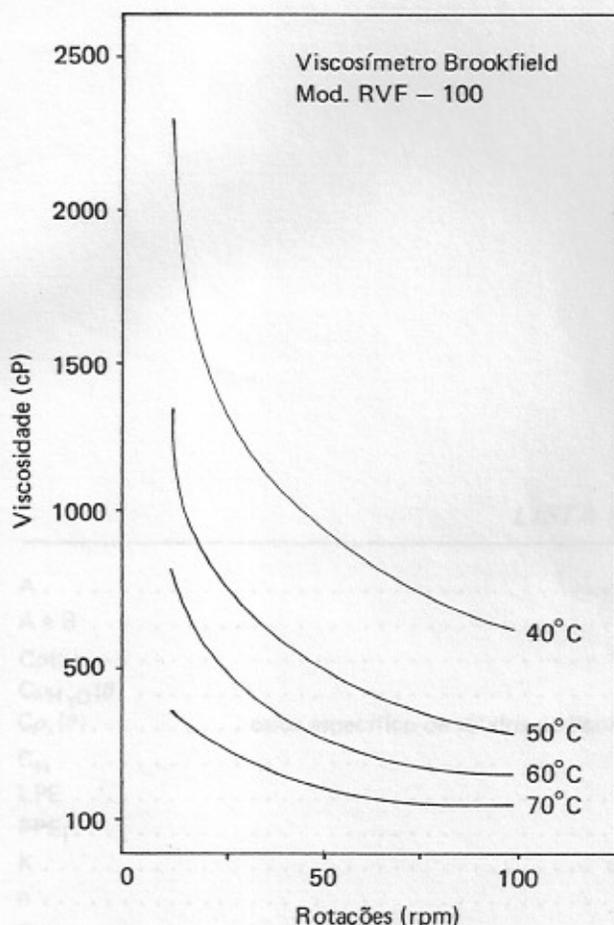


FIGURA 10 - Comportamento reológico de licor de sólidos de 39,8%

TABELA 4 - Relação entre a viscosidade (cP) do licor negro e teor de sólidos (<35%) para várias temperaturas

Amostra	Teor de sólidos (%)	Temperatura		
		40°C	60°C	80°C
1 (a)	12,7	1,724	1,165	0,841
2 (a)	16,1	2,255	1,487	1,013
3 (a)	17,0	1,913	1,320	0,959
4 (a)	19,6	2,293	1,509	1,106
5 (b)	20,6	4,407	2,675	2,332
6 (b)	23,9	4,120	2,392	2,069
7 (b)	26,3	7,787	4,510	3,772
8 (b)	29,1	6,120	3,343	2,613
9 (b)	32,2	9,090	6,170	4,497

Nota: (a) medidas em viscosímetro capilar; (b) medidas em viscosímetro Saybolt.

TABELA 5 - Variação da viscosidade (cP) a 80°C de licor negro para diversos teores de sólidos

Amostra	Teor de sólidos (%)	Rotação da haste			
		10 rpm	20 rpm	50 rpm	100 rpm
1	39,8	11,0	16,5	26,0	35,8
2	44,1	140	120	106	121
3	45,9	650	465	320	250
4	51,6	12 500	7 600	4 200	2 800
5	51,8	13 300	7 700	-	-
6	56,1	57 200	31 600	-	-
7	59,3	59 300	32 400	-	-

### CONCLUSÃO

O presente trabalho levantou informações sobre as características e propriedades do licor negro de eucalipto, consideradas as mais importantes para o procedimento de cálculos de engenharia e auxílio ao controle de processo.

Em trabalhos futuros pretende-se a complementação destas informações, através do estudo de propriedades reológicas do licor negro e das pastas celulósicas a diferentes temperaturas e concentrações, e através da determinação de condutividade térmica do licor negro.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSUMPÇÃO, R.M.V. et alii. Propriedades de engenharia do licor negro sulfato de *Eucalyptus spp*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3, São Paulo, 1983. *Anais...* São Paulo, ABCP, 1983. v.3, p.643-59.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Elaboração e difusão dos "Engineering Data", relativos ao licor negro de Eucalyptus spp*. São Paulo, IPT/CTCP, 1984. (Relatório nº 16 842/4).

### LISTA DE SÍMBOLOS

---

A . . . . .	área de troca térmica, em m <sup>2</sup>
A e B . . . . .	constantes que dependem do teor de sólidos da amostra
$C_p(\theta)$ . . . . .	calor específico do licor negro à temperatura $\theta$ , em cal/(g.°C)
$C_{pH_2O}(\theta)$ . . . . .	calor específico de água à temperatura $\theta$ , em cal/(g.°C)
$C_{ps}(\theta)$ . . . . .	calor específico de sólidos do licor negro, em 0,327 cal/(g.°C) a 70°C e 0,349 cal/(g.°C) a 90°C
$C_{ss}$ . . . . .	teor de cinza sulfatada como Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , base licor em %
EPE . . . . .	elevação do ponto de ebulição, em °C
EPE <sub>j</sub> . . . . .	elevação do ponto de ebulição do efeito j, em °C
K . . . . .	um fator que depende do teor de compostos inorgânicos no licor
n . . . . .	número de efeitos
Q . . . . .	fluxo de calor, em kcal/h
$T_s$ . . . . .	% em massa de sólidos secos da amostra (teor de sólidos)
U . . . . .	coeficiente global de transferência de calor, em kcal/(h.m <sup>2</sup> .°C)
$\mu$ . . . . .	viscosidade, em cP
$\rho$ . . . . .	massa específica, em g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{te}$ . . . . .	massa específica na temperatura de ebulição à pressão atmosférica, em g/cm <sup>3</sup>
$\theta$ . . . . .	temperatura, em °C
$\theta_f$ . . . . .	temperatura correspondente ao vácuo no último efeito de evaporação, em °C
$\theta_i$ . . . . .	temperatura de condensação do vapor vivo do 1º efeito de evaporação, em °C
$\tau$ . . . . .	tensão de cisalhamento (força aplicada por unidade de área da placa, necessária para manter velocidade constante), em N/m <sup>2</sup>
$\Delta\theta$ . . . . .	salto térmico aparente, em °C
$\Delta v, dv$ . . . . .	diferença e diferencial de velocidade, em m/s
$\Delta y, dy$ . . . . .	diferença e diferencial de espessura do filme de fluido, em m

### LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 1 - Massa específica X teor de sólidos .....	3
FIGURA 2 - Nomograma da massa específica do licor negro kraft ( $\rho$ ) X teor de sólidos ( $T_s$ ) e X temperatura ( $\theta$ ) ....	4
FIGURA 3 - Calor específico X teor de sólidos .....	5
FIGURA 4 - Faixa de variação de tensão superficial de licores negros com teores de sólidos entre 13 - 35% .....	6
FIGURA 5 - Elevação do ponto de ebulição X teor de sólidos para as diferentes fábricas .....	7
FIGURA 6 - Elevação do ponto de ebulição X teor de cinza sulfatada .....	8
FIGURA 7 - Elevação do ponto de ebulição X massa específica .....	8
FIGURA 8 - Nomograma da elevação do ponto de ebulição (EPE) do licor negro kraft X teores de cinza sulfatada ...	9
FIGURA 9 - Nomograma da elevação do ponto de ebulição do licor negro kraft (EPE) X massa específica na temperatura de ebulição ( $\rho_{te}$ ) .....	10
FIGURA 10 - Comportamento reológico de licor de sólidos de 39,8% .....	11

### LISTA DE TABELAS

---

TABELA 1 - Composição química do material inorgânico de licor negro sulfato de <i>Eucalyptus spp.</i> . . . . .	2
TABELA 2 - Poder calorífico superior de licor negro e análise elementar dos sólidos . . . . .	3
TABELA 3 - Influência da temperatura e do teor de sólidos na tensão superficial de licor negro . . . . .	6
TABELA 4 - Relação entre viscosidade (cP) do licor negro e teor de sólidos (<35%) para várias temperaturas . . . . .	11
TABELA 5 - Variação da viscosidade (cP) a 80°C de licor negro para diversos teores de sólidos . . . . .	11