

275

INTER-RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS DOS PROCESSOS  
DE DESAGUAMENTO E SECAGEM "FLASH" DE POLPA  
KRAFT NÃO-BRANQUEADA

---

Martins, M.A.L.<sup>1</sup>  
Foelkel, C.E.B.<sup>2</sup>  
Sauer, M.J.<sup>2</sup>  
Vesz, J.B.V.<sup>2</sup>  
Marengo, J.V.<sup>2</sup>  
Milanez, A.F.<sup>2</sup>



<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa - Viçosa - MG - Brasil

<sup>2</sup>Riocell - Rio Grande Cia. de Celulose do Sul-Guaíba-RS-Brasil

## 0. Introdução

Na fabricação de celulose de mercado, um gasto apreciável é necessário para secar a polpa, a fim de permitir seu fácil e econômico transporte. Esse custo de secagem incide diretamente no custo final de fabricação, já que para isso, recursos energéticos são utilizados em quantidade razoável, como energia elétrica, vapor e combustível (fóssil ou biomassa). Com as restrições impostas dia-a-dia pelo preço do combustível e pelas pressões governamentais para redução do consumo de óleo, tornou-se essencial aos industriais tirar o máximo proveito das instalações disponíveis. Existem diversas maneiras de se secar a celulose, sendo as mais comuns os secadores de cilindros, os secadores a colchão de ar e os secadores instantâneos ou rápidos ("flash"). Nos dois primeiros tipos, consome-se principalmente energia elétrica e vapor. Já na secagem "flash", parte substancial da energia calorífica é fornecida na forma de ar aquecido por combustão de óleo. Tendo em vista o objetivo geralizado de buscar formas de reduzir o consumo específico de óleo combustível, decidiu-se realizar essa pesquisa. Deve-se encará-la como uma pesquisa inicial de otimização, um primeiro passo na busca de melhor performance das instalações existentes, através do uso de modelagem matemática. Para tal, procurou-se estudar as inter-relações entre as variáveis dos processos de desaguamento e secagem "flash" da polpa kraft não-branqueada produzida pela Riocell - Rio Grande Cia. de Celulose do Sul a partir de madeiras de eucalipto e acácia negra em mistura na proporção 75% eucalipto e 25% acácia, base volume. Em trabalhos posteriores, pretende-se dar continuidade à pesquisa, através de uma otimização mais completa, envolvendo balanços térmicos e mássicos e melhor apreciação dos consumos específicos de insumos. A primeira tentativa ora apresentada visa dar uma indicação das maneiras mais imediatas que se dispõe

-----

Trabalho apresentado no XV Congresso Anual da ABCP - Semana do Papel - em São Paulo - Brasil - de 22 a 26 de novembro de 1982

para melhorar o desempenho da instalação da forma como ela vem sendo operada.

A remoção de água da polpa pelo sistema em estudo é feita em duas etapas. Na primeira, onde a maior proporção (-95%) da água é removida, a polpa aquecida é prensada e, através de esforço mecânico, eleva-se sua consistência até 46-50%. A seguir, a polpa é desfibrada e os flocos de celulose são rapidamente secados, cedendo água para um ar previamente aquecido.

## 1. A instalação de desaguamento

### 1.1. Descrição

A polpa ingressa no sistema de desaguamento oriunda da instalação de lavagem. Ao sair do segundo filtro lavador, a uma consistência de cerca de 14 a 18%, a polpa é desagregada por uma rosca e enviada ou para uma torre de alta consistência (pulmão) ou diretamente a um tanque de massa. Em ambos os casos, a polpa é grosseiramente diluída com "água branca" respectivamente para consistências de 10 e 5%. Do tanque de massa, a polpa é enviada ao tanque de bombeamento, passando antes por um ajuste de consistência para a faixa 3,5 - 4,5%. Nesse tanque de bombeamento, aplica-se vapor direto para controlar a temperatura entre 80 a 85°C. O "overflow" do tanque de bombeamento, que é um tanque fechado, volta ao tanque de massa. A massa é succionada do tanque de bombeamento e enviada por bombas especiais às três linhas de desaguamento. Cada linha é constituída de uma prensa de dois rolos gêmeos (Sund), um desagregador ("shredder"), uma rosca transportadora e um desfibrador ("shredder master").

A massa é bombeada e mantida sob pressão na tina da prensa. A única alternativa que lhe resta é passar por entre os dois rolos perfurados que se movem em sentidos opostos. O espaçamento entre os rolos é ajustado previamente e não pode ser controlado operacionalmente. O efeito desaguador é regulado pelo torque, ou seja, pelo esforço que a prensa está fazendo para desaguar a massa. Procura-se manter o mesmo torque para garantir desaguamento uniforme. Com as alterações de fluxo de massa, o recurso para manter o torque é mudar a velocidade dos rolos. As indicações de torque e velocidade são relativas e variáveis em escala 0 - 100.

A massa, a uma consistência de 3,5 - 4,5%, passa então sob pressão entre os dois rolos e mais de 90% de sua água contida é removida, migrando para o interior dos dois rolos, que são perfurados (furos de cerca de  $\pm 1$  mm). Essa água turva, contendo ainda compostos orgânicos e sódicos dissolvidos, é encaminhada ao tanque de água branca e re-aquecida com vapor para 85°C para manter todo o sistema à mesma temperatura. A maior parte dessa água branca é encaminhada como água de lavagem nos três primeiros chuveiros do filtro lavador nº 2 da instalação de lavagem da polpa. O restante da água branca, em um ciclo fechado, é utilizada para diluição e ajustes de consistência da polpa saindo do filtro lavador nº 2 ao tanque de massa ou à torre de alta consistência e do tanque de massa ao tanque de bombeamento.

A manta de polpa prensada cai em um desagregador, é fragmentada e por uma rosca transportadora é encaminhada a um desfibrador de discos (superior fixo, inferior móvel) que a transforma em pequenos flocos. Esses flocos são então encaminhados à secagem "flash".

1.2. Modelagem matemática na instalação de desaguamento  
 Procurou-se inicialmente verificar a inter-dependência entre as diversas variáveis, quer operacionais ou de qualidade de polpa, no setor de desaguamento. Para isso, coletaram-se oito conjuntos de dados, em diferentes períodos de funcionamento das prensas (linhas A, B e C).

As variáveis analisadas, seus valores médios e respectivos desvios padrões e amplitudes, estão mostrados no Quadro I.

Quadro I: Variáveis analisadas na instalação de desaguamento (média para uma linha de desaguamento)

Variável	$\bar{X}$	$s$	C.V.	Máximo	Mínimo
<u>Polpa</u>					
$X_1$ = número kappa	18,77	1,98	10,5	22,9	14,6
$X_2$ = solubilidade em NaOH 5% ( $S_5$ ), %	12,10	0,94	7,8	13,4	9,0
$X_3$ = viscosidade, $cm^3/g$	1159	56	4,8	1200	1087
<u>Tanque de bombeamento</u>					
$X_4$ = consistência, %	4,25	0,35	8,3	5,08	3,38
$X_5$ = temperatura, °C	78	3,28	4,2	83	69
$X_6$ = fluxo de polpa úmida, $l/min$	3788	252	6,7	4248	3481
$X_7$ = fluxo polpa seca, $kg/min$	160,7	13,26	8,2	176,7	119,7
<u>Prensagem</u>					
$X_8$ = torque relativo, %	79,4	0,80	1,0	80	78
$X_9$ = velocidade, %	71,8	4,85	6,8	78	57
$X_{10}$ = pressão, $kg/cm^2$	0,80	0,15	19,3	1,15	0,42
$Y_{11}$ = consistência saída, %	47,37	1,29	2,7	50,8	45,3
$X_{12}$ = água removida, $l/min$	3450	244	7,1	3881	3117
$X_{13}$ = água removida, $l/t$ a.s. polpa	21578	1992	9,2	27514	17560

Primeiramente, buscou-se conhecer, através de análise de regressão linear simples, a influência de cada variável em algumas principais. Considerou-se, que no caso da instalação de desaguamento, as variáveis dependentes Y mais importantes para um estudo de modelagem seriam: consistência de saída das prensas ( $Y_{11}$ ) e água removida por tonelada a.s. de polpa ( $Y_{13}$ ). Para os oito conjuntos de dados disponíveis, procurou-se verificar quais as demais variáveis que maior correlação apresentavam com as mesmas e qual o nível de significância com que essa influência se verificava.

$Y_{11}$  = CONSISTÊNCIA DE SAÍDA DA PRENSA

Mostrou correlação bastante significativa com as seguintes variáveis:

(X<sub>1</sub>) ... (P < 0,001) ... número kappa ... correlação negativa  
 (X<sub>2</sub>) ... (P < 0,05) ... S<sub>5</sub> ... correlação negativa  
 (X<sub>3</sub>) ... (P < 0,02) ... viscosidade ... correlação negativa  
 (X<sub>9</sub>) ... (P < 0,0001)... veloc. prensa... correlação negativa

Tendo em vista terem sido analisados diversos conjuntos de dados, foram obtidas diversas equações relacionando individualmente Y<sub>11</sub> com as quatro variáveis com as quais foram obtidos melhores níveis de significância.

As melhores equações estão apresentadas a seguir:

Y<sub>11</sub> x X<sub>1</sub>: (consistência saída prensa) x (número kappa)

$$Y_{11} \cdot 1 = 74,0646 - 1,37874 X_{1 \cdot 1} \quad (r_{25gl} = - 0,45)$$

$$Y_{11} \cdot 2 = 86,7909 - 2,08345 X_{1 \cdot 2} \quad (r_{25gl} = - 0,45)$$

$$Y_{11} \cdot 3 = 84,0897 - 1,95577 X_{1 \cdot 3} \quad (r_{267gl} = - 0,46)$$

$$Y_{11} \cdot 4 = 89,1275 - 2,17338 X_{1 \cdot 4} \quad (r_{272gl} = - 0,40)$$

$$Y_{11} \cdot 5 = 53,5045 - 0,32647 X_{1 \cdot 5} \quad (r_{39gl} = - 0,50)$$

Y<sub>11</sub> x X<sub>2</sub>: (consistência saída prensa) x (S<sub>5</sub>)

$$Y_{11} \cdot 1 = 53,28006 - 0,48807 X_{2 \cdot 1} \quad (r_{39gl} = - 0,36)$$

Y<sub>11</sub> x X<sub>3</sub>: (consistência saída prensa) x (viscosidade)

$$Y_{11} \cdot 1 = 63,2154 - 0,01344 X_{3 \cdot 1} \quad (r_{20gl} = - 0,39)$$

$$Y_{11} \cdot 2 = 61,6776 - 0,01140 X_{3 \cdot 2} \quad (r_{25gl} = - 0,63)$$

$$Y_{11} \cdot 3 = 59,6034 - 0,009891 X_{3 \cdot 3} \quad (r_{25gl} = - 0,46)$$

$$Y_{11} \cdot 4 = 58,3805 - 0,009702 X_{3 \cdot 4} \quad (r_{25gl} = - 0,34)$$

Y<sub>11</sub> x X<sub>9</sub>: (consistência saída prensa) x (velocidade)

$$Y_{11} \cdot 1 = 58,9857 - 0,16179 X_{9 \cdot 1} \quad (r_{39gl} = - 0,61)$$

A seguir, procurou-se expressar a variável Y<sub>11</sub> em função de mais de duas variáveis, através de análise de regressão linear múltipla:

Y<sub>11</sub> = f(X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) (kappa, S<sub>5</sub>, viscosidade)

$$Y_{11} = 58,580834 - 0,284621 X_1 - 0,399759 X_2 - 0,0008024 X_3$$

$$r_{14gl} = 0,82$$

Y<sub>11</sub> = f(X<sub>1</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>6</sub>) → (kappa, consistência tq. bombeamento, temperatura, fluxo polpa úmida)

$$Y_{11} = 60,207701 - 0,183856 X_1 - 0,506689 X_4 + 0,006176 X_5 - 0,002186 X_6$$

$$r_{26gl} = 0,45$$

$$r \text{ parcial}_{11} - 1 = - 0,24$$

$$r \text{ parcial}_{11} - 4 = 0,009$$

$$r \text{ parcial}_{11} - 5 = - 0,15$$

$$r \text{ parcial}_{11} - 6 = - 0,41$$

Uma explicação sobre o significado dos valores dos coeficientes de correlação seria válido. O valor do r total = 0,45 indica que 20,25 % (r<sup>2</sup>) da variabilidade de Y<sub>11</sub> é explica

da pela variabilidade combinada de  $X_1$ ,  $X_4$ ,  $X_5$  e  $X_6$ . O significado dos  $r$  parciais é o seguinte: mantidas constantes as demais variáveis, ele indica a influência de uma variável independente na outra dependente. Ex.: mantidas constantes a consistência e temperatura do tanque de bombeamento e o fluxo de polpa úmida, o número kappa mostra uma correlação negativa com a consistência após prensa da ordem de  $r_{11-1} = -0,24$ .

$$Y_{11} = f(X_1, X_2, X_4, X_5) \rightarrow \text{(kappa, } S_5, \text{ consistência bombeamento, temperatura)}$$

$$Y_{11} = 47,478369 - 0,212463 X_1 - 0,445650 X_2 - 0,506297 X_4 + 0,146527 X_5$$

$$\begin{aligned} r_{36gl} &= 0,61 \\ r_{\text{parcial } 11-1} &= -0,30 \\ r_{\text{parcial } 11-2} &= -0,27 \\ r_{\text{parcial } 11-4} &= -0,12 \\ r_{\text{parcial } 11-5} &= +0,36 \end{aligned}$$

$$Y_{11} = f(X_1, X_4, X_5, X_8, X_9, X_{10}) \rightarrow \text{(kappa, consistência bombeamento, temperatura, torque, velocidade, pressão)}$$

$$Y_{11} = 22,879962 + 0,002783 X_1 - 1,277589 X_4 + 0,137665 X_5 + 0,376865 X_8 - 0,151021 X_9 + 0,066443 X_{10}$$

$$r_{34gl} = 0,76$$

$$Y_{11} = f(X_1, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}) \rightarrow \text{(kappa, consistência bombeamento, fluxo polpa seca, torque, velocidade, pressão)}$$

$$Y_{11} = 25,244172 - 0,042489 X_1 - 1,605123 X_4 + 0,0322197 X_7 + 0,442765 X_8 - 0,150067 X_9 + 0,238033 X_{10}$$

$$r_{34gl} = 0,73$$

$$Y_{11} = f(X_8, X_9, X_{10}) \rightarrow \text{(torque, velocidade, pressão)}$$

$$Y_{11} = 30,986221 + 0,352387 X_8 - 0,156655 X_9 - 0,4311870 X_{10}$$

$$\begin{aligned} r_{37gl} &= 0,65 \\ r_{\text{parcial } 11-8} &= +0,23 \\ r_{\text{parcial } 11-9} &= -0,61 \\ r_{\text{parcial } 11-10} &= -0,07 \end{aligned}$$

$$Y_{11} = f(X_1, X_2, X_4, X_5) \rightarrow \text{(kappa, } S_5, \text{ consistência bombeamento, temperatura)}$$

$$Y_{11} = 47,478369 - 0,212463 X_1 - 0,445650 X_2 - 0,506297 X_4 + 0,146527 X_5$$

$$\begin{aligned} r_{36gl} &= 0,61 \\ r_{\text{parcial } 11-1} &= -0,30 \\ r_{\text{parcial } 11-2} &= -0,27 \\ r_{\text{parcial } 11-4} &= -0,12 \\ r_{\text{parcial } 11-5} &= 0,36 \end{aligned}$$

$$Y_{11} = f(X_1, X_2, X_4, X_5, X_7) \rightarrow \{ \text{kappa, } S_5, \text{ consistência bombeamento, temperatura, fluxo polpa seca} \}$$

$$Y_{11} = 47,476693 - 0,210344 X_1 - 0,445933 X_2 - 0,480092 X_4 + 0,147599 X_5 - 0,001429 X_7$$

$$r_{35} gl = 0,61$$

Observar a alta explicação para a variabilidade da consistência de saída da prensa em função múltipla de variáveis como número kappa,  $S_5$ , viscosidade, torque, velocidade, fluxo, pressão, etc. É possível, com base nessas equações obtidas com dados reais de operação da instalação, buscar as melhores relações entre elas de forma a aumentar de maneira aceitável a consistência da polpa após prensagem.

$$Y_{13} = \text{ÁGUA REMOVIDA, } \ell/t \text{ a.s. polpa}$$

A água removida na instalação de prensagem mostrou alta significância com as seguintes variáveis:

( $X_1$ )	...	( $P < 0,001$ )	...	número kappa	...	correlação negativa
( $X_2$ )	...	( $P < 0,001$ )	...	$S_5$	...	correlação negativa
( $X_4$ )	...	( $P < 0,0001$ )	...	cons. bombeam.	...	correlação negativa
( $X_7$ )	...	( $P < 0,001$ )	...	fluxo polpa seca	..	correlação negativa
( $X_9$ )	...	( $P < 0,01$ )	...	velocidade	...	correlação negativa
( $X_{11}$ )	...	( $P < 0,01$ )	...	consistência	...	correlação positiva
				saída prensa		

Individualmente, as equações relacionando  $Y_{13}$  e essas seis variáveis foram as seguintes:

$$Y_{13} = 33147,18 - 616,25 X_1 \quad (r_{39} gl = - 0,61)$$

$$Y_{13} = 37876,01 - 1347,19 X_2 \quad (r_{39} gl = - 0,63)$$

$$Y_{13} = 45270,08 - 5573,92 X_4 \quad (r_{39} gl = - 0,99)$$

$$Y_{13} = 38636,97 - 106,14 X_7 \quad (r_{39} gl = - 0,71)$$

$$Y_{13} = 36027,18 - 201,36 X_9 \quad (r_{39} gl = - 0,49)$$

$$Y_{13} = - 9827,89 + 662,92 X_{11} \quad (r_{39} gl = + 0,43)$$

A seguir, procurou-se expressar a variável  $Y_{13}$  em função de mais de duas variáveis, através de análise de regressão múltipla. As principais equações obtidas foram:

$$Y_{13} = f(X_8, X_9, X_{10}) \rightarrow \{ \text{torque, velocidade, pressão} \}$$

$$Y_{13} = 110074,1949 - 893,974607 X_8 - 208,244268 X_9 - 3223,443174 X_{10}$$

$$r_{37} gl = 0,68$$

$$r_{\text{parcial } 13 - 8} = - 0,39$$

$$r_{\text{parcial } 13 - 9} = - 0,57$$

$$r_{\text{parcial } 13 - 10} = - 0,32$$

$$Y_{13} = f(X_1, X_2, X_4, X_5) \rightarrow (\text{kappa}, S_5, \text{consist\^encia bombeamento, temperatura})$$

$$Y_{13} = 46192,91 + 11,293724 X_1 - 201,847177 X_2 - 5307,5759 X_4 + 2,242571 X_5$$

$$r_{36gl} = 0,99$$

$$r_{\text{parcial } 13-1} = 0,07$$

$$r_{\text{parcial } 13-2} = -0,51$$

$$r_{\text{parcial } 13-4} = -0,99$$

$$r_{\text{parcial } 13-5} = 0,03$$

$$Y_{13} = f(X_1, X_2, X_4, X_5, X_7) \rightarrow (\text{kappa}, S_5, \text{consist\^encia bombeamento, temperatura, fluxo polpa seca})$$

$$Y_{13} = 46182,56 + 24,3710 X_1 - 203,5946 X_2 - 5145,8159 X_4 + 8,8557 X_5 - 8,8194 X_7$$

$$r_{35gl} = 0,9944$$

Observar que uma das variáveis, a consistência do tanque de bombeamento, como é óbvio, representa a maior contribuição para a remoção de água por tonelada de polpa a.s.. As variáveis de prensagem como fluxo de polpa seca, velocidade da prensa e consistência de saída da prensa também influem na remoção de mais ou menos água por peso de polpa seca processada. Entretanto, essa influência está mais relacionada ao fluxo de polpa à instalação.

## 2. A instalação de secagem flash

### 2.1. Descrição

A secagem "flash" é uma continuação do processo de remoção de água da polpa, seguindo-se ao desaguamento por prensagem. Antes de ser admitida no processo de secagem, a polpa é desfibrada, a fim de se aumentar a superfície de troca térmica e permitir melhor migração da água a evaporar. A evaporação da água é conseguida pelo contato dos flocos de fibras com ar quente, o que é feito em três estágios na instalação em estudo. O tempo total de retenção das fibras no secador é curtíssimo (20 - 40 segundos), daí a denominação secagem "flash" (rápida, instantânea).

O ar de secagem da polpa é aquecido com vapor e pela combustão de óleo em uma fornalha. A queima de óleo se faz em fornalha de paredes duplas entre as quais circula o maior fluxo de ar (ar terciário ou ar de combustão) para pré-aquecimento. Esse ar é soprado a seguir para um conjunto de trocadores de calor que consiste de dois grupos de radiadores aquecidos a vapor: um por vapor de 13 ata e outro de 4 ata. Parte do vapor de 4 ata é originado pela expansão do condensado do vapor de 13 ata. Esse ar terciário, já aquecido adentra à câmara de combustão, promovendo a queima do óleo e se aquecendo mais até cerca de 300°C. O óleo é soprado para o interior da fornalha recebendo ar primário (atmosférico) para sua atomização. Radialmente dirigido sobre o bico de óleo, injeta-se o ar secundá-

rio (atmosférico), cuja função é criar condições para a queima inicial do óleo nas proximidades do bico queimador.

Para a queima, utiliza-se óleo combustível tipo E, pré-aquecido a 110°C.

Da fornalha o ar aquecido adentra na câmara plenum, que pode ser considerada como um homogeneizador do ar aquecido. Para entrar nessa câmara o ar deve passar por um conjunto de chicanas que retêm eventuais fagulhas, partículas, etc.

A polpa, após desfibrador, cai na linha de alimentação do primeiro estágio de secagem, sendo succionada por um ventilador que a sopra com ar quente para o torre do 1º estágio. O ar provém principalmente da câmara plenum e outra parte é ar reciclado oriundo do ciclone do segundo estágio de secagem. Através de abertura de dampers, regula-se o fluxo e a mistura dos ares de forma a alcançar a temperatura desejada no estágio. As torres do 1º e 2º estágio são cilindros de aço carbono fechados no topo e com duplas paredes laterais. O ar quente empurra a polpa para cima no cilindro interno e, ao alcançar o topo, o próprio ar direciona os flocos pela única saída que encontra, que é entre as duas paredes dos cilindros concêntricos. Saindo da torre, a polpa continua sendo impulsio-  
nada até o ciclone do 1º estágio, onde se desaera. O ar separado arrasta fibras e para evitar poluição atmosférica passa por um scrubber que retém as partículas sólidas. Esse ar, por sua alta umidade, não é reaproveitado na secagem.

A polpa que sai do ciclone vai para a 2ª torre de secagem succionada e, a seguir, empurrada por um ventilador. Através de dois dampers, regula-se a quantidade e a mistura de ar quente da câmara plenum e ar atmosférico, para alcançar a temperatura desejada. O trajeto da polpa no interior da torre do 2º estágio é similar ao da primeira torre. Igualmente, a polpa carregada pelo ar vai para um ciclone do 2º estágio onde é desaerada. O ar separado, em parte vai para a atmosfera, via scrubber anteriormente mencionado, e em parte retorna como ar quente para o 1º estágio.

A polpa, a seguir, é encaminhada para o 3º estágio de secagem, que na verdade constitui-se de um tubo longo que tem mais função de arrefecer a temperatura da polpa, pois o ar injetado é ar atmosférico. Entretanto, esse estágio também promove ligeira evaporação da água residual.

Ao final do 3º estágio, a polpa encontra dois ciclon-  
es cuja função, além de desaerar, é de permitir o controle da altura e peso do fardo na prensa "slab". Esse controle é feito por manobra especial, direcionando e dividindo o fluxo de polpa entre as duas calhas de alimentação da prensa. A polpa, que ingressa na prensa slab, contém ainda ar residual. Para garantia de qualidade no formato e homogeneidade dos far-  
dos, a câmara da prensa é mantida sob certo vácuo. O ar daí removido, rico em poeira, é succionado e injetado na sucção do ventilador do terceiro estágio de secagem.

O fardo formado recebe depois nova prensagem e é en-  
caminhado ao setor de unitização. O teor de umidade final da polpa costuma variar entre 10 a 14%.



## 2.2. Modelagem matemática na instalação de secagem "flash"

Da mesma forma que para o setor de desaguamento, procurou-se inicialmente verificar a inter-dependência entre as diversas variáveis. Seis conjuntos de dados, concomitantes ao desaguamento, foram analisados. As variáveis estudadas, seus valores médios, desvios padrões e amplitudes estão mostrados no Quadro II. Por se tratarem de conjuntos de dados distintos, obtidos em períodos e linhas diferentes, existe uma certa variabilidade entre os mesmos. Entretanto, o objetivo principal da pesquisa era caracterizar a inter-relação entre as variáveis e não buscar estabelecer um modelo matemático único que fosse aplicável para todas as linhas. O mesmo é válido para o setor de desaguamento.

Quadro II: Variáveis analisadas na instalação de secagem "flash" (média para uma linha de secagem)

Variável	$\bar{X}$	$s$	C.V.	Máximo	Mínimo
<u>Polpa</u>					
Z <sub>1</sub> = número kappa	18,77	1,98	10,5	22,9	14,6
Z <sub>2</sub> = solubilidade em NaOH 5% (S <sub>5</sub> ), %	12,10	0,94	7,8	13,4	9,0
Z <sub>3</sub> = viscosidade, cm <sup>3</sup> /g	1159	56	4,8	1200	1087
<u>Prensa desaguadora</u>					
Z <sub>4</sub> = consistência saída prensa, %	47,37	1,29	2,7	50,8	45,3
<u>Secagem "flash"</u>					
Z <sub>5</sub> = produção, t.a.d./24h	257,04	21,21	8,2	282,72	191,52
Z <sub>6</sub> = temperatura câmara plenum, °C	318,5	31,34	9,8	365	250
Z <sub>7</sub> = consistência saída secagem, %	87,91	1,41	1,6	90,20	84,90
W <sub>8</sub> = água removida flash ℓ/t.a.s.	974,46	59,67	6,1	1091,0	824,8
W <sub>9</sub> = consumo específico óleo, kg/t.a.d. polpa	48,18	5,48	11,4	50,25	35,60
W <sub>10</sub> = consumo específico óleo, kg/t. água removida	54,96	6,51	11,7	59,03	44,97

Primeiramente, buscou-se conhecer, através da análise de regressão linear simples, a influência de cada variável sobre as outras. Considerou-se, que no caso da instalação de secagem, as variáveis independentes "W" mais importantes para um estudo de modelagem matemática seriam: água removida no "flash" (W<sub>8</sub>) e consumo específico de óleo por t.a.d. polpa (W<sub>9</sub>). Para os seis conjuntos de dados disponíveis, procurou-se verificar quais as demais variáveis que maior relação apresentavam com as mesmas e qual o nível de significância com que essa influência se verificava.

W<sub>8</sub> = ÁGUA REMOVIDA NO FLASH (ℓ/t.a.s.)

A principal variável a afetar a quantidade de água a ser removida na secagem é a consistência da polpa ingressante na instalação, ou seja, saindo da seção de prensagem. Dessa

forma, todas as variáveis que afetam a consistência após prensagem, afetam também a performance da secagem. Procurou-se retirar da análise as variáveis da prensagem que sabidamente interferem na consistência após prensa, ficando essa como a única variável da prensagem presente na otimização da secagem.

Com isso, a variável  $W_8$  mostrou significância em sua relação com as seguintes variáveis independentes:

(Z <sub>1</sub> ) ... (P < 0,001)	... número kappa...	... correlação positiva
(Z <sub>2</sub> ) ... (P < 0,02)	... S <sub>5</sub>	... correlação positiva
(Z <sub>3</sub> ) ... (P < 0,02)	... viscosidade	... correlação positiva
(Z <sub>4</sub> ) ... (P < 0,0001)	... consis. saída da prensa	... correlação negativa
(Z <sub>6</sub> ) ... (P < 0,001)	... temperatura câmara plenum	... correlação positiva
(Z <sub>7</sub> ) ... (P < 0,05)	... consistência saída secagem	... correlação positiva

Tendo em vista terem sido analisados diversos conjuntos de dados, foram obtidas diversas equações relacionando individualmente  $W_8$  com as variáveis com as quais foram obtidos melhores níveis de significância. As melhores equações estão apresentadas a seguir:

$W_8 \times Z_1$ : (água removida secagem "flash") x (número kappa)

$$W_8 = 669,2271 + 16,2588 Z_1 \quad (r_{39gl} = + 0,54)$$

$W_8 \times Z_2$ : (água removida secagem "flash") x (S<sub>5</sub>)

$$W_8 = 685,4875 + 23,8865 Z_2 \quad (r_{39gl} = + 0,38)$$

$W_8 \times Z_4$ : (água removida secagem "flash") x (consistência saída prensa)

$$W_8 = 3053,69 - 43,89 Z_4 \quad (r_{39gl} = - 0,95)$$

$W_8 \times Z_6$ : (água removida secagem "flash") x (temperatura câmara plenum)

$$W_8 = 620,7652 + 1,1105 Z_6 \quad (r_{39gl} = + 0,58)$$

$W_8 \times Z_7$ : (água removida secagem "flash") x (consistência saída secagem)

$$W_8 = - 221,5752 + 13,6056 Z_7 \quad (r_{39gl} = + 0,32)$$

A seguir, procurou-se obter uma equação de regressão linear múltipla, expressando  $W_8$  em função de  $Z_4$ ,  $Z_6$  e  $Z_7$ .

$W_8 = f(Z_4, Z_6, Z_7)$  → (consistência saída prensa, temperatura câmara plenum, consistência saída "flash")

$$W_8 = 1890,6702 - 43,8448 Z_4 - 0,006655 Z_6 + 13,2307 Z_7$$

$$r_{37gl} = 0,999$$

$$r_{\text{parcial } 8-4} = - 0,86$$

$$r_{\text{parcial } 8 - 6} = - 0,08$$

$$r_{\text{parcial } 8 - 7} = + 0,99$$

W<sub>9</sub> = CONSUMO ESPECÍFICO ÓLEO POR TONELADA AD POLPA

Mostrou correlação significativa com as seguintes variáveis:

(Z <sub>1</sub> ) ... (P < 0,001) ... número kappa	... correlação positiva
(Z <sub>2</sub> ) ... (P < 0,02) ... S <sub>5</sub>	... correlação positiva
(Z <sub>3</sub> ) ... (P < 0,02) ... viscosidade	... correlação positiva
(Z <sub>4</sub> ) ... (P < 0,0001) ... consistência saída prensa	... correlação negativa
(Z <sub>6</sub> ) ... (P < 0,001) ... temperatura câmara plenum	... correlação positiva
(Z <sub>7</sub> ) ... (P < 0,05) ... consistência saída secagem	... correlação positiva
(Z <sub>8</sub> ) ... (P < 0,001) ... água removida secagem	... correlação positiva

As melhores equações individuais relacionando W<sub>9</sub> e algumas dessas variáveis estão apresentadas a seguir:

W<sub>9</sub> x Z<sub>1</sub>: (consumo óleo/t.a.d.) x (número kappa)

$$W_9 \cdot 1 = 35,683976 + 0,666075 Z_1 \cdot 1 \quad (r_{39gl} = +0,24)$$

$$W_9 \cdot 2 = 16,900763 + 1,411230 Z_1 \cdot 2 \quad (r_{39gl} = +0,47)$$

$$W_9 \cdot 2 = 31,818012 + 0,639496 Z_1 \cdot 3 \quad (r_{39gl} = +0,29)$$

W<sub>9</sub> x Z<sub>4</sub>: (consumo óleo/t.a.d.) x (consistência saída prensa)

$$W_9 \cdot 1 = 138,766981 - 1,911926 Z_4 \cdot 1 \quad (r_{39gl} = -0,45)$$

$$W_9 \cdot 2 = 127,637513 - 1,761205 Z_4 \cdot 2 \quad (r_{25gl} = -0,35)$$

$$W_9 \cdot 3 = 93,123858 - 1,108134 Z_4 \cdot 3 \quad (r_{20gl} = -0,65)$$

$$W_9 \cdot 4 = 142,369786 - 2,125659 Z_4 \cdot 4 \quad (r_{39gl} = -0,61)$$

W<sub>9</sub> x Z<sub>6</sub>: (consumo óleo/t.a.d.) x (temperatura câmara plenum)

$$W_9 \cdot 1 = 21,690072 + 0,0832002 Z_6 \cdot 1 \quad (r_{39gl} = +0,48)$$

$$W_9 \cdot 2 = 8,221758 + 0,116941 Z_6 \cdot 2 \quad (r_{39gl} = +0,67)$$

W<sub>9</sub> x Z<sub>8</sub>: (consumo óleo/t.a.d.) x (água removida na secagem)

$$W_9 \cdot 1 = 10,093606 + 0,039093 Z_8 \cdot 1 \quad (r_{39gl} = +0,42)$$

A seguir, buscaram-se equações que apresentassem W<sub>9</sub> em função de algumas das variáveis que a afetam diretamente. Para isso, valeu-se da aplicação das técnicas de análise de regressão linear múltipla.

$W_9 = f(Z_4, Z_6, Z_7, Z_8) \rightarrow$  (consistência saída prensa, temperatura câmara plenum, consistência saída secagem, água removida "flash")

$$W_9 = 1286,5001 - 29,025888 Z_4 + 0,0520533 Z_6 + 8,428410 Z_7 - 0,636960 Z_8$$

$$r_{36gl} = 0,57$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 4} = - 0,28$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 6} = + 0,28$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 7} = + 0,26$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 8} = - 0,27$$

$W_9 = f(Z_4, Z_6, Z_7) \rightarrow$  (consistência saída prensa, temperatura câmara plenum, consistência saída secagem)

$$W_9 = 82,218088 - 1,0984831 Z_4 + 0,0562926 Z_6 + 0,0009445 Z_7$$

$$r_{37gl} = 0,52$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 4} = - 0,21$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 6} = + 0,28$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 7} = + 0,002$$

$W_9 = f(Z_1, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7) \rightarrow$  (kappa, consistência saída prensa, produção, temperatura câmara plenum, consistência saída secagem)

$$W_9 \cdot 1 = 19,097705 + 0,330723 Z_1 - 0,543269 Z_4 - 0,054008 Z_5 + 0,147529 Z_6 + 0,151970 Z_7$$

$$r_{35gl} = 0,82$$

$$W_9 \cdot 2 = 67,092340 + 0,436274 Z_1 - 1,098528 Z_4 - 0,011273 Z_5 + 0,032022 Z_6 + 0,216777 Z_7$$

$$r_{35gl} = 0,56$$

$W_9 = f(Z_1, Z_4, Z_6) \rightarrow$  (kappa, consistência saída prensa, temperatura câmara plenum)

$$W_9 \cdot 1 = 39,776003 + 0,327133 Z_1 - 0,734573 Z_4 + 0,104427 Z_6$$

$$r_{37gl} = 0,72$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 1} = + 0,12$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 4} = - 0,31$$

$$r_{\text{parcial } 9 - 6} = + 0,58$$

### 3. Conclusões

As técnicas estatísticas utilizadas permitem avaliar a influência de cada uma das variáveis sobre as outras. Elas colocam à mão do setor operacional uma ferramenta útil no objetivo de otimizar a performance das instalações. Através do manuseio adequado das inúmeras equações fornecidas, pode-se avaliar em como alterar as variáveis disponíveis de forma a obter melhores resultados operacionais.

Quando o objetivo for a redução do consumo de combustível utilizado na secagem, certamente a variável mais importante a se considerar é a quantidade de água a evaporar nessa instalação. Essa, por sua vez, é função direta da consistência da polpa que sai do setor de desaguamento e adentra à secagem. Dessa forma, as variáveis que afetam o desaguamento afetam indiretamente a secagem. Entretanto, dentro da seção secagem existem também variáveis com as quais se pode manusear para garantir mínimo consumo de óleo.

De maneira geral, pode-se reduzir o consumo de óleo na secagem "flash" de polpa kraft não-branqueada pelas seguintes alternativas isoladas ou concomitantes:

- redução do número kappa;
- redução da viscosidade da polpa;
- redução do  $S_2$  da polpa;
- aumento da temperatura da polpa a desaguar;
- aumento do torque da prensa;
- aumento da pressão na tina da prensa;
- redução de fluxo de polpa às prensas;
- redução da velocidade da prensa (significa fluxo de polpa menor);
- aumento consistência após prensagem;
- diminuição temperatura câmara plenum;
- evitar super-secagem.

Essas recomendações não devem ser encaradas como objetivos rígidos, pois muitas delas exigem análises mais completas para se avaliar sua viabilidade técnica e econômica. Por exemplo, reduzir o número kappa para economizar óleo na secagem pode não ser vantajoso pela perda de rendimento no processamento e outras inter-relações. Por outro lado, devido sua natureza oscilante, inúmeras vezes o número kappa diminui ou aumenta no sistema. Nesses momentos, pode-se, p.e., buscar nas equações múltiplas, como alterar as demais variáveis para manter uniforme o processo.

A seguir, está apresentado um exemplo em atitude que pode ser tomada com base nos modelos matemáticos apresentados:

Exemplo: O setor de fabricação de celulose, objetivando aumentar o rendimento do processo, prevê um aumento do número kappa médio de 18 para 20. Como proceder na secagem para manter iguais a temperatura da câmara plena = 300°C e o consumo específico de óleo em 45 kg/t.a.d. polpa?

Solução:

Seja a equação:

$$W_9 = 39,776003 + 0,327133 Z_1 - 0,734573 Z_4 + 0,104427 Z_6$$

Para condição 1:  $Z_1 = 18$

$$W_9 = 45$$

$$Z_6 = 300$$

$$Z_4 = ?$$

$$Z_4 = 43,55\% \text{ (consistência após prensa)}$$

Para condição 2:  $Z_1' = 20$

$$W_9 = 45$$

$$Z_6 = 300$$

$$Z_4' = ?$$

Calcula-se :  $Z_4' = 44,44\%$

Resposta: Com o aumento do número kappa, em 2 unidades, deve-se aumentar a consistência da polpa após prensa em 0,89%, como uma das alternativas.

#### 4. Agradecimentos

Os autores externam seus agradecimentos ao engenheiro L.A. Coimbra, chefe do Departamento de Fabricação da Rio-cell, pela valiosa colaboração prestada ao longo dessa pesquisa.