

Desaguamento em caixas de sucção

Uma revisão bibliográfica

Dewatering on suction boxes – A literature review

Autor: Vinícius Lobosco, PhD, process intelligence da Paperplat, Suécia

Palavras-chave: vácuo, fluxos de ar e água, compressão, temperatura, saturação irreduzível, tempo de residência, distribuição de poros, reumedecimento, desaguamento com membranas, modelação matemática

RESUMO

Este trabalho tenciona apresentar uma resenha teórica com foco nas experiências realizadas na área do desaguamento a vácuo e oferecer algumas sugestões quanto a possíveis modificações deste processo. O trabalho se distribui em três partes principais: o quadro teórico, as experiências e a modelação.

Na primeira das partes principais, é apresentado o quadro teórico, baseado nos dois fenômenos fundamentais que ocorrem numa caixa de sucção: a compressão da camada (ou folha) de fibras e os fluxos de ar e água. Inclui o conceito do ponto de equilíbrio de saturação - a saturação a partir da qual nenhuma água adicional é removida por fluxo de ar a uma dada pressão de vácuo - que demonstrou ser essencial para a descrição de algumas experiências. Trata-se especialmente do caso em que a condição de operação está próxima desse ponto.

São analisadas experiências feitas

Abstract

This article attempts to present a theoretical framework that comprehends the experiments performed in the field of vacuum dewatering and give us some insights about possible modifications of the process. The report contains three main parts: theoretical framework, experiments and modeling.

In the first main part, the theoretical framework is presented. It is based on two fundamental phenomena occurring in a suction box: fibre network compression and air and water flow. Further, the concept of equilibrium saturation level - the saturation where no further water is removed by airflow at a given vacuum pressure - showed to be essential for the description of some experiments. This is especially the case when the operation condition is close to that point.

Experiments performed in this field are reviewed and their results, mostly regarding the rate and the extent of dewatering, were interpreted according to the theoretical framework presented. Some speculations of possible results outside the experimental range were presented, putting these results in a broader perspective.

Finally, some of the models proposed for both vacuum dewatering and other correlated areas were reviewed. Jointly they include the phenomena taking place in the experiments, but some results cannot be explained with each of them alone.

Keywords: *vacuum, air and water flows, compression, temperature, irreducible saturation, pores distribution, rewetting, membrane dewatering, mathematical modelling.*

no campo, e os resultados - principalmente os relativos à taxa e à extensão do desaguamento - foram interpretados em conformidade com o quadro teórico descrito. São expostas algumas especulações quanto a resultados possíveis fora dos limites das experiências, resultados esses colocados em perspectiva mais ampla.

Finalmente, foram revisados alguns dos modelos propostos para o desaguamento a vácuo e outras áreas correlatas. Em conjunto, abrangem os fenômenos que ocorrem nos experimentos, mas alguns resultados não podem ser explicados isoladamente com cada um deles.

DESAGUAMENTO NA FABRICAÇÃO DE PAPEL - RETROSPECTIVA

Quando a folha úmida atinge um conteúdo de sólidos de 4% a 7%, o ar começa a fluir através dela, caracterizando a linha-seca [Räisänen, 2000] sobre a tela. Nesse ponto pode ser visualizada uma camada - ou folha - de fibras, e a consolidação é o processo dominante, sendo este o início da zona de desaguamento a vácuo. Uma zona que se estende desde a linha-seca até o rolo de sucção é também definida como a zona de alto vácuo ou zona de vácuo seco.

O vácuo é obtido passando-se a folha úmida sobre caixas de sucção e sobre o rolo de sucção. As caixas de sucção têm cobertura perfurada ou com fendas, de cerâmica ou de outro material de baixo coeficiente de atrito. Ao passar sobre as caixas de sucção estacionárias, a folha úmida e a tela são submetidas a uma série de pulsos de sucção, enquanto sobre o rolo de sucção são submetidas a pulso de vácuo constante. Nas caixas de sucção, o nível de vácuo varia entre 10 e 50 kPa, enquanto no rolo de sucção a variação é de 40 a 80 kPa. Cada pulso de sucção tem duração de milissegundos, e o tempo de exposição totaliza cerca de 0,1 s.

Conforme Räisänen [2000], na Finlândia as bombas de vácuo respondem por 17% do total de energia elétrica utilizada numa máquina de papel, sendo que cerca de um terço é consumido na seção da tela. Além disso, grande parte desta energia parece ser consumida apenas para fazer passar ar através da trama de fibras e da tela sem qualquer remoção de água.

O processo de desaguamento em caixas de sucção é uma questão complexa, que envolve fluxo de duas fases, isto é, de água e ar, através de um meio poroso, no caso a folha - ou camada - de fibras e a tela. Ao mesmo tempo, a camada de fibras está se consolidando, devido à ação de arraste do fluxo das duas fases. Além disso, o meio poroso é de distribuição estocástica - ou aleatória - de fibras e de finos, onde também existem forças capilares.

O desaguamento a vácuo tem sido ob-

reto de muitas experiências, das quais resultou uma importante quantidade de dados, embora em volume ainda pequeno se comparado ao espaço das possibilidades. Contudo, não tem sido colocada à disposição qualquer exposição teórica geral capaz de explicar, ainda que não totalmente, os dados experimentais obtidos mais tarde, como o desaguamento com membrana, por exemplo. Uma estruturação teórica facilitaria o entendimento do processo e, possivelmente, auxiliaria na especulação acerca das implicações de eventuais modificações de processo.

O intento desta revisão bibliográfica é dar um passo adiante na montagem teórica dos fenômenos que ocorrem numa caixa de sucção. Queremos crer que esta revisão irá dar mais clareza a experimentos feitos neste campo, situando-os num contexto mais amplo, e que nos possa oferecer algumas indicações de como buscar uma descrição mais rigorosa dos fenômenos envolvidos, o que, por fim, poderá conduzir à modelação matemática do processo.

ESTRUTURA TEÓRICA

O conhecimento dos princípios da Física a que correspondem os fenômenos que acontecem numa caixa de sucção poderá contribuir para o desenvolvimento de melhores seções de sucção e também para a formulação de novas sugestões quanto a modificações em equipamentos existentes para o desempenho mais eficiente do sistema. Parece, contudo, que a interpretação física dos fenômenos que se produzem nas caixas de sucção tenha sido de certo modo negligenciada pelos pesquisadores do setor de papel, embora tenham sido objeto de estudo desde 1954, conforme sabe o autor. Uma tal pesquisa habilitaria a uma análise mais direta e à modelação do processo.

Fundamentalmente, o desaguamento é produzido por via mecânica. Apesar de o desaguamento também poder dar-se por evaporação, vários pesquisadores têm considerado esse efeito irrelevante para o processo.

O vácuo aplicado nas caixas de suc-

ção gera um gradiente de pressão nos fluidos e, conseqüentemente, um gradiente de pressão estrutural na camada de fibras. O gradiente de pressão nos fluidos resulta num fluxo de duas fases: fluxo de ar e de água através da camada de fibras. A cada seccionamento em plano no sentido perpendicular à direção-z da folha, a carga total aplicada é equilibrada pela pressão hidráulica e pela pressão estrutural (se forem negligenciados termos inerciais) [Kataja *et al.*, 1995]:

$$\sigma_t = -\sigma_s + \phi p_h$$

ϕ é um fator que se situa entre porosidade e uniformidade. A pressão na camada de fibras aumenta no sentido do fluxo, enquanto a pressão hidráulica diminui, do que resulta uma folha úmida comprimida desigualmente. Isto decorre, principalmente, da interação viscosa entre os fluidos e a estrutura da camada.

Por isso, o desaguamento abrange ambos os mecanismos de fluxo e de consolidação. Aqui, será primeiramente considerada apenas a deformação da camada de fibras, seguida pela ação do fluxo através da camada, negligenciando-se, deste modo, a sua deformação. Por fim, serão apresentados alguns aspectos relevantes da interação entre estes dois fenômenos juntamente com as possibilidades de melhoramentos no desaguamento em caixas de sucção.

Pressão estrutural

A interação dos fluxos de ar e água com a camada de fibras dá origem a uma tensão que comprime a folha úmida. Essa pressão é usualmente definida como pressão estrutural, embora também haja ocorrência de tensão da camada de fibras.

O comportamento da tensão-deformação estrutural pode ser relação-dependente ou não. Foi demonstrado que, para cargas elevadas, o comportamento da camada de fibras depende do grau de compressão [Lobosco e Kaul, 2005], algo atribuído ao efeito da extração de água das paredes e do lúmen da fibra. Experiências realizadas por Carlsson *et al.* [1977] mostra-

ram que a extração da água começa quando a concentração de sólidos é de aproximadamente 20%. Conseqüentemente, para teor de sólidos inferior a 20%, o comportamento da tensão-deformação estrutural é provavelmente de relação-dependente.

Algumas pesquisas estudaram a compressibilidade estática da camada de fibras [Ingmanson, 1952; Wilder, 1960; Jones, 1963; Elias, 1967; Vomhof e Schmidt, 1997]. Os resultados foram descritos, geralmente, como uma lei de potência entre o conteúdo de sólidos e a pressão [Campbell, 1947]:

$$C = M \left(\frac{\sigma}{p_r} \right)^N,$$

onde C é o conteúdo de sólidos, σ a pressão aplicada e M e N são duas constantes do material. É uma referência de pressão de modo a evitar inversão em M .

Fluxos de ar e água

Água e ar são acionados através da camada de fibras pelo gradiente de pressão nessas fases. A equação de Darcy, originalmente desenvolvida para descrever o fluxo de fase única, em meio poroso saturado, pode ser estendida, também, para descrição do fluxo de duas fases, água e ar, através da camada de fibras:

$$q_f = \frac{KK_{rf}}{\mu_f} \cdot \text{grad}p_f,$$

onde K é a permeabilidade absoluta e, para cada fase, q é a velocidade de Darcy (fluxo de cada fase por unidade de área normal ao sentido do fluxo), K_r é a permeabilidade relativa, μ é a viscosidade do fluido e p_f é a pressão no fluido. Por isso, a lei de Darcy é estendida a fluxo de duas fases mediante aplicação do conceito da permeabilidade relativa, que é função da saturação do líquido, ou manta (Figura 1).

Na camada de fibras, as pressões de ar e líquido diferem pela pressão capilar:

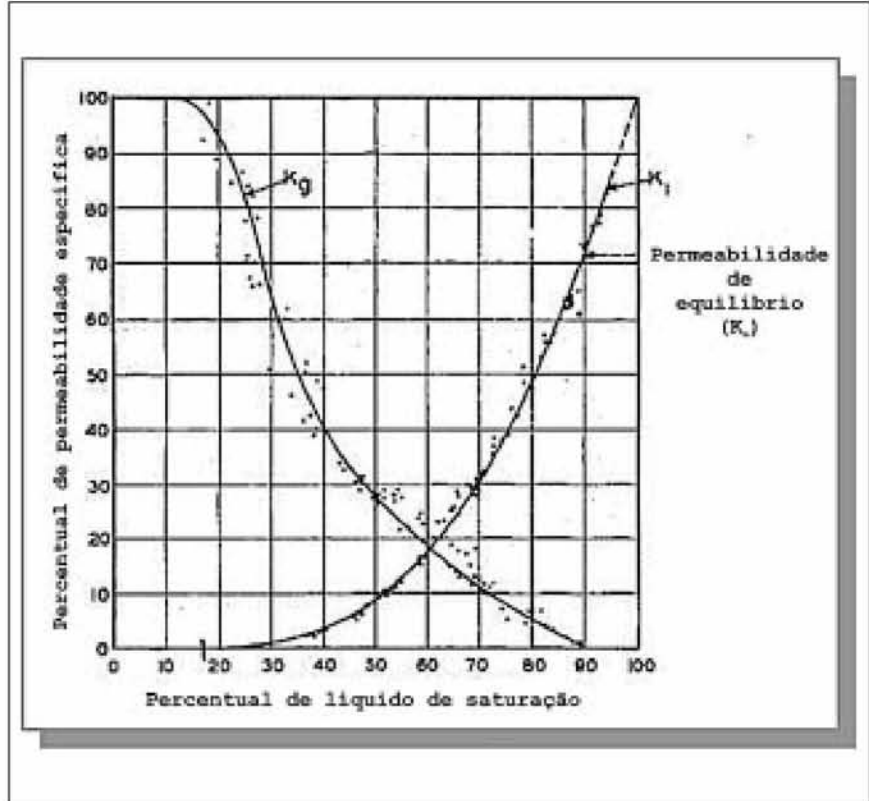


Figura 1. Permeabilidade relativa como função da saturação para ar e água em areia [Wyckoff em Brownell e Katz, 1947]

$$p_c(S) = p_a - p_w.$$

onde S é a saturação, que é definida como:

$$S = \frac{\phi_l}{\phi},$$

ϕ_l é a fração do volume ocupada pela água e ϕ é a porosidade do meio.

A pressão capilar desempenha importante função no desaguamento a vácuo, pois equilibra, total ou parcialmente, o gradiente da pressão do ar, eliminando ou reduzindo o gradiente neto da pressão na água e constituindo-se em obstáculo ao desaguamento. Quando os pulsos de vácuo terminam, pode acontecer o reumedecimento por efeito das forças capilares. A pressão capilar é função da saturação do meio (Figura 2).

Durante o processo de fabricação de papel, a folha úmida é submetida à ação do vácuo. A água existente nos poros maiores – onde a queda de pressão do ar é maior que a pressão capilar – é removida depois

de certo tempo, determinado pela equação de Darcy. Se a diferença da pressão de ar aplicada através da folha for menor que a *pressão-limite (threshold pressure)*, nenhum ar penetrará na folha, mas acontecerá apenas uma leve compressão da camada fibrosa. O grau de saturação é mantido em 1. Quando a pressão-limite é ultrapassada, o ar começa a entrar na folha, caracterizando o definido *nenhum desaguamento por fluxo de ar* [Hosten e Sastry, 1989]. Com o gradiente da pressão do ar continuando a crescer, a pressão de *ruptura* será por fim atingida, resultando em fluxo de ar no sentido efluente da camada de fibras. Deste ponto em diante, passa a haver um regime de *fluxo de ar de desaguamento* e continuará a haver remoção de água, mas apenas de forma marginal [Hosten e Sastry, 1989].

A pressões superiores à pressão-limite, a saturação da torta (camada) cai abaixo de 1 e, por fim, atinge o equilíbrio de saturação, S_e . Segundo Mällner-Rid e Pausch, um aumento no tempo de exposição ao vácuo que ultrapasse 0,2 s resulta em

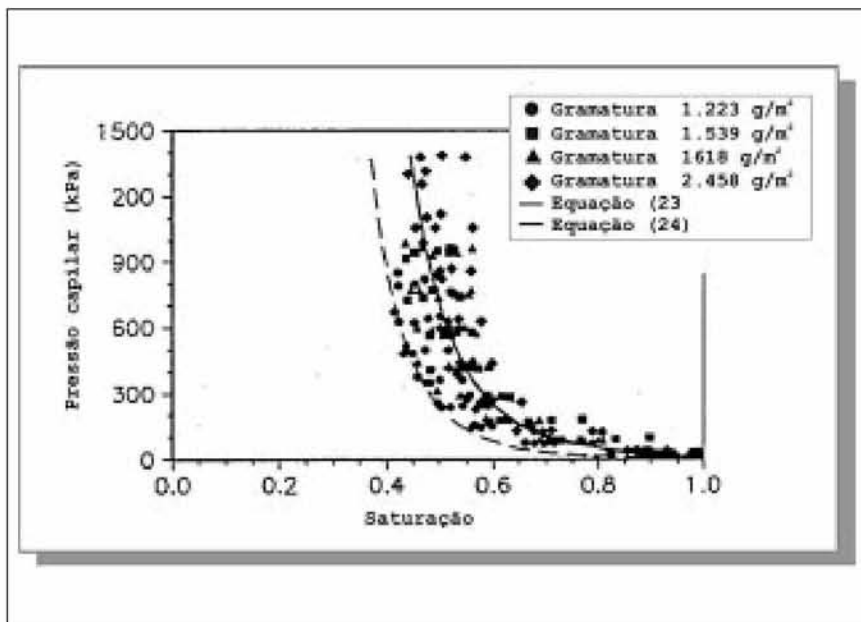


Figura 2. Pressão capilar como função da saturação na camada de fibras [Asensio e Seyed-Yagoobi, 1994]

pouco melhoramento na secagem da folha, seja qual for a intensidade do vácuo aplicado [Trasente, 1991]. Esse tempo de exposição pode ser interpretado como uma estimativa grosseira do tempo requerido para atingir S_c .

O equilíbrio de saturação é uma medida da intensidade do desaguamento (para uma dada porosidade) e depende da grandeza do vácuo aplicado e das características da camada e do líquido. O equilíbrio de saturação se reduz com a redução da pressão do ar aplicada até que seja atingido o ponto de saturação irredutível, S_{∞} (Figura 3). Nesse ponto a permeabilidade líquida desaparece, e a saturação cessa de diminuir, mesmo que a pressão do ar cresça indefinidamente. A Figura 1 mostra esta limitação à permeabilidade da água na areia quando a saturação irredutível é de aproximadamente 0,18. Asensio e colaboradores [1994] constataram que, para folhas úmidas, a saturação irredutível se situa em aproximadamente 0,37.

Possibilidades teóricas de melhoramentos no desaguamento

Da exposição anterior resulta claro que há muito pouco a ganhar de um aumento no nível de vácuo quando a saturação na folha úmida está próxima de S_{∞} (Figura 3). Caso se queira

mais desaguamento, podem ser feitas algumas abordagens com vistas à redução do equilíbrio de saturação. Pode ser cogitada a modificação das propriedades do fluido ou do meio de filtração ou, ainda, da camada.

Redução da tensão superficial diminui a pressão-limite requerida para retirar água bloqueada em canais quase em-plano. Por sua vez, a tensão super-

ficial pode ser diminuída tanto por redução da temperatura [Wakeman e Tarleton, 1991] como por uso de aditivos químicos. Portanto, maior teor de sólidos por via de aumento da temperatura não é, provavelmente, decorrente apenas da menor viscosidade da água, como manifestado por pesquisadores anteriores.

A segunda possibilidade seria a substituição do meio filtrante. No caso do papel, a adição de uma membrana com microporos entre a folha e a tela. Como citado mais acima, experiências feitas com tais arranjos melhoraram consideravelmente a remoção de água [Anlauf, 1988; Annon, 1988; Lindblom e Blomqvist, 2001], o que aponta para uma diminuição no equilíbrio de saturação.

A última possibilidade seria a modificação das propriedades do meio de desaguamento. Isso tem sido conseguido mediante a colocação de uma membrana sobre a folha úmida [Trasente, 1991; Moosavifar, 2003]. Utiliza-se uma membrana de alta resistência ao fluxo, o que gera pressão estrutural mais alta através da folha úmida, o que resulta em uma folha

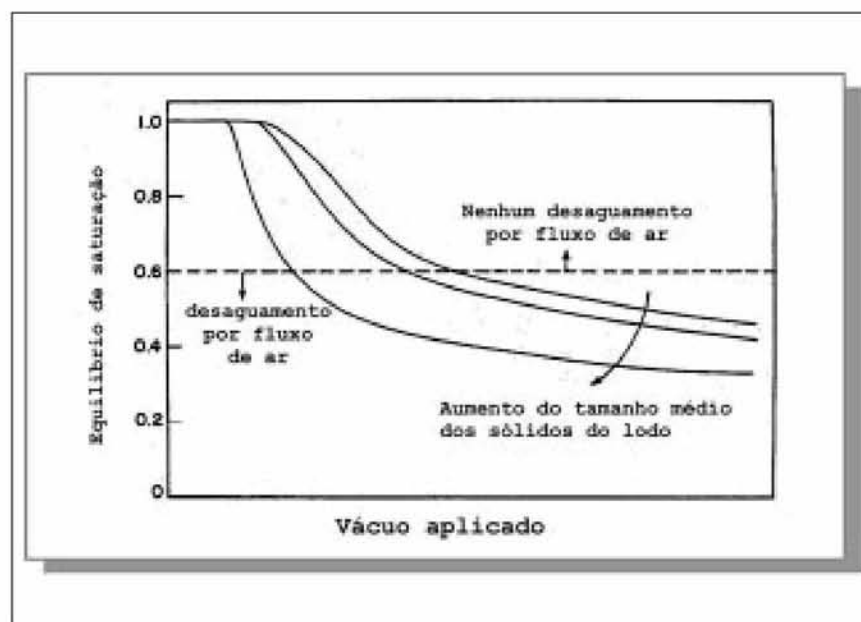


Figura 3. Tendência geral do equilíbrio de saturação em relação ao vácuo aplicado, em lodos de hematita [Hosten e Sastry, 1989]

mais consolidada, com menor retenção de água em poros de extremidades falsamente cegas, mas também em pressão hidráulica menor. Em níveis de vácuo suficientemente altos, o equilíbrio de saturação não muda notavelmente com queda de pressão através da folha. Portanto, a saturação é uma quantidade crucial na descrição do fluxo e também, mais especificamente, da grandeza do desaguamento em meio poroso.

Devido à alta deformabilidade das camadas de fibras, a porosidade diminui facilmente mesmo sob baixas pressões (o denominador diminui). Assim, caso seja possível alcançar a mesma saturação, mais água pode ser removida (numerador pode ser reduzido).

Para entender mais facilmente essa conexão entre consolidação e desaguamento, imagine-se, por exemplo, uma folha que está em seu índice de saturação pela aplicação, através dela, de diferença de pressão de ar. Se a pressão estrutural pudesse ser aumentada, pela colocação da membrana sobre a folha, por exemplo (para simplificação, assumam-se que a diferença da pressão de ar através da folha ainda seja a mesma de anteriormente), a saturação crescerá (e a porosidade diminuirá). Assumindo-se, desse modo, que, nesse processo, o equilíbrio de saturação esteja praticamente inalterado, ocorrerá um novo potencial de desaguamento – até que a saturação atinja novamente o equilíbrio de saturação.

Um exemplo numérico pode explicar isso melhor. Assumam-se que, antes de passar pelas caixas de sucção a folha úmida esteja saturada com conteúdo de sólidos de 6,5%. Considerem-se, então, dois casos: a folha úmida é submetida a vácuo com e sem uma membrana sobreposta por tempo suficientemente longo a ponto de permitir que atinja o ponto de equilíbrio de saturação. Para simplificar, admitimos que, no último caso, a camada de fibras não é deformada,

mantendo, portanto, sua espessura original de 300 μm . Para o primeiro caso, assume-se que a espessura da folha caia à metade da condição de referência (sem a membrana). Admitindo-se que a saturação irreduzível de aproximadamente 0,37 [Asensio e Seyed-Yagoobi, 1994] seja obtida em ambos os casos (algo provável devido às pequenas dimensões e à diferença relativamente alta da pressão de ar aplicada através da folha úmida), o teor de sólidos aumentaria de 19% para 30%. Mesmo que, com a deformação da folha úmida, haja aumento no nível do equilíbrio de saturação, o resultado agregado ainda pode levar a uma diminuição no conteúdo de sólidos.

Conforme esta análise racional, é evidente que poderia ser alcançado um efeito semelhante àquele obtido com uma membrana permeável sobre a folha úmida por prensagem direta e aplicação simultânea do vácuo, desde que pressão e vácuo sejam de grandeza compatível com o que adviria da aplicação da membrana. Tal esquema tem como vantagem o fato de que a intensidade destes dois graus de liberdade pode ser provavelmente otimizada segundo as diferentes qualidades da polpa, ao passo que a otimização com membrana exigiria sua substituição para cada nova condição de processo. A desvantagem refere-se à alta pressão que teria de ser aplicada com uma tela.

EXPERIÊNCIAS

Alguns pesquisadores têm estudado a maioria dos parâmetros que influenciam o desaguamento no processo a vácuo, como intensidade do vácuo, tempo sob vácuo e frequência, temperatura, características da massa e gramatura. Aqui, os resultados desses estudos são apresentados à luz da estruturação teórica descrita acima. Adicionalmente, serão apresentados resultados experimentais com a exposição racional dos possíveis me-

canismos mediante os quais foi removida água da camada de fibras.

Vácuo

Intensidade. O efeito do aumento do nível de vácuo em extensão e grau de desaguamento é quase intuitivo. Quanto mais alto o nível de vácuo, maior será a quantidade removida de água situada em cavidades, onde a queda de pressão é mais alta que a pressão-limite. Aumento do nível de vácuo também resulta em maior taxa de desaguamento naqueles poros. Além disso, a queda de pressão através da folha também contribui para a compressão da camada de fibras, o que torna acessível parte da água bloqueada.

Em efeito, alguns testes em máquinas experimentais [Brauns e Oskarsson, 1953; Eames e Moore, 1976; Neun e Fielding, 1994; Shands e Hardwick, 2000] e de laboratório [Attwood, 1960; Räsänen e Paulapuro, 1994] indicam aumento do desaguamento em taxa e extensão quando há maior nível de vácuo (Figura 4 – esquerda). Este efeito, todavia, é mais evidente no caso de gramaturas altas [Attwood, 1960]. O crescimento do desaguamento diminui com o aumento do vácuo.

Experiências feitas em máquinas-piloto comprovam que caixas de sucção com níveis de vácuo crescentes produzem desaguamento melhor que com vácuo em nível médio constante [Brauns e Orkarsson, 1953; Eames e Moore, 1976]. Isso indica que em níveis mais altos de vácuo é esvaziada uma quantidade maior de poros. Eames e Moore têm também comparado o desempenho de uma série de caixas de sucção com níveis de vácuo crescentes no sentido máquina com outra série de caixas com níveis de vácuo decrescentes (Figura 4 – direita). Nesse caso, o desempenho pior da operação com níveis de vácuo decrescentes pode ser explicado pelo fato de que, nas primei-

ras caixas de sucção, não houve tempo para retirar toda a água e, portanto, certa quantidade restou nos poros, o que poderia ter sido removido com mais vácuo. Mais: vácuo alto melhora a compressão das camadas de fibra junto à tela, retardando, com isso, o desaguamento. Um modelo baseado na Física talvez pudesse esclarecer um pouco mais tal efeito.

Tempo de exposição. Alguns testes também demonstram que o desaguamento aumenta com o tempo de exposição, mas a taxa de drenagem diminui com tempos de exposição mais longos [Nordman, 1954; Attwood, 1962; Neun e Fielding, 1993, 1994; Neun, 1995; Räsänen e Paulapuro, 1995]. Estes resultados mostram a dinâmica do esvaziamento dos poros.

Pulsção. Conforme citado anteriormente, as forças de arraste entre os fluidos e a camada de fibras caracterizam a redução da pressão hidráulica, que é gradualmente absorvida (no sentido do fluxo) pela trama de fibras como pressão estrutural (ver seção Estrutura teórica). Isso gera uma compactação desuniforme da folha, de modo que a camada fica

estratificada nas proximidade da tela. Tal estratificação é tanto maior quanto mais compressível for a folha. A região de maior compactação é de permeabilidade menor, o que dificulta o fluxo e aumenta mais a compactação. A pulsção, então, alivia este efeito por causar expansão da folha entre os pulsos.

A pulsção também pode influenciar o reumedecimento (ver a seção *Reumedecimento*, a seguir) pelo efeito raspador da aresta frontal das fendas da caixa de sucção; é, portanto, normalmente difícil saber qual dos fenômenos predomina – se o alívio da compactação das camadas em contato com a tela ou se o reumedecimento.

Lindberg [1970] estudou em laboratório a influência da frequência da sucção em caixas de sucção úmidas. Os resultados mostram somente a influência da frequência no desaguamento (Figura 5). Quanto mais alta a curva, mais refinadas as polpas. Das curvas resulta claro que a contribuição da pulsção tem maior relevância para polpas mais compressíveis. Esses resultados estão em concordância com o fato de que o fenômeno da estratificação pode ser a razão do me-

lhor desaguamento em regime de altas frequências de pulsção quando com camada condizente de fibras. Os resultados são confirmados por Mitchell e Johnson [2000], que trabalharam no mesmo equipamento de laboratório utilizado por Karilla e Räsänen [1992].

Resultados informados por Räsänen e Paulapuro [1995] mostram que, em situação de vácuo baixo (20 kPa), a menor frequência da pulsção produz um desaguamento melhor. Para vácuo alto (40 kPa), foi constatado o contrário, provavelmente porque em maior nível de vácuo a folha está mais estratificada.

Resultados reportados por Mitchell e Johnson [2000] separam o efeito da frequência do efeito do comprimento do pulso e confirmam as conclusões de Räsänen e Paulapuro [1995] quanto ao comprimento do pulso. No caso de folhas feitas com polpas químicas, pulsos de comprimento mais curto melhoraram o desaguamento nas condições de altos níveis de vácuo, enquanto pulsos longos desaguavam melhor em baixos níveis de vácuo. Desaguamento com folhas feitas com pasta mecânica, que é mais rígida, foi sempre melhor com pulsos longos. O efeito da frequên-

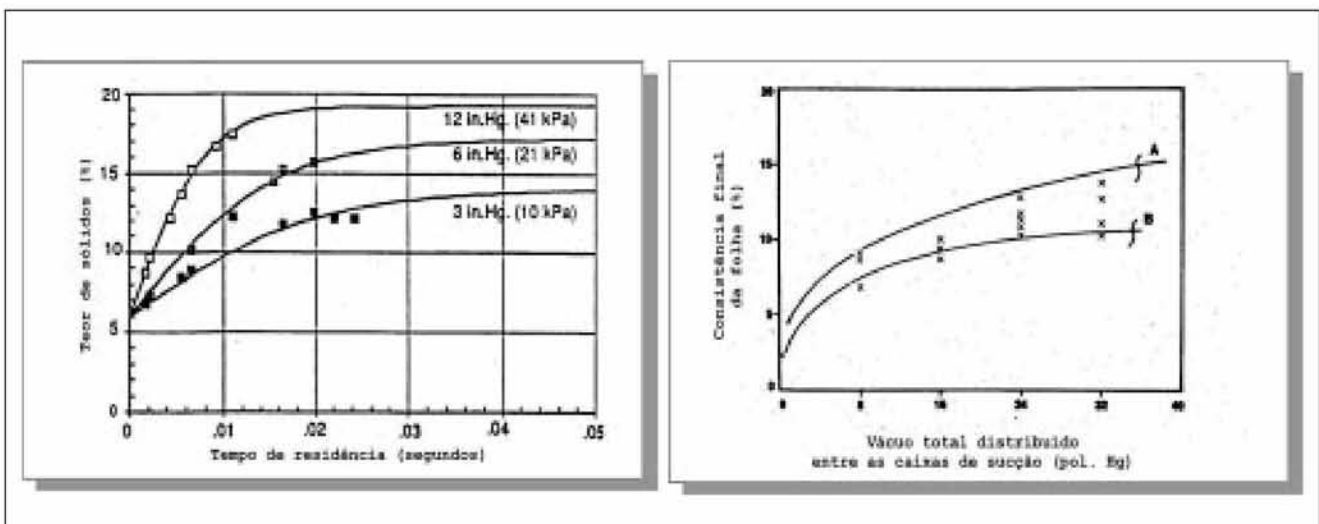


Figura 4. Esquerda: teor de sólidos como função do tempo para três níveis de vácuo [Cagnon e Neun, 1996]. Direita: comparação do desaguamento em uma série de caixas de sucção com níveis de vácuo crescentes (A) e em uma série de caixas com níveis de vácuo decrescentes (B) [Eames e Moore, 1976]

cia revelou-se significativo apenas para as polpas altamente refinadas (210 CSF), que têm forças capilares maiores, como efeito, provavelmente, da redução em reumedecimento.

Räisänen e Paulapuro [1995] também estudaram, em laboratório, o efeito da frequência do pulso na retenção. Sucção contínua resulta em melhor retenção, pois as camadas próximas à tela são mantidas sob compressão durante todo o pulso e bloqueiam mais facilmente os finos e as cargas.

Alguns pesquisadores têm negligenciado o efeito da frequência. Neun e Fielding [1993, 1994], Neun [1995, 1996], Cagnon e Neun [1996] assumem que a pulsação não tem nenhuma influência no desaguamento e que somente contaria o tempo de efetiva exposição ao vácuo.

Reumedecimento

Como visto anteriormente, quando a folha úmida passa sobre uma caixa de vácuo, recebe uma série de pulsos de sucção. Durante os pulsos, a folha é comprimida e irá se expandir nos intervalos entre pulsos. Durante a expansão, alguma água existente na tela pode fluir de volta à folha, devido a forças capilares. Além disso, quando a folha é separada da tela, a água existente em cavidades entre a folha e a tela é repartida entre ambas. Repetindo a nomenclatura usada por Norman [1987] ao classificar o reumedecimento na prensagem, o primeiro caso é definido de reumedecimento externo, e o segundo, de reumedecimento de separação.

McDonald [1989] estudou o reumedecimento de separação em máquina-piloto com método proposto por Sweet [1961]:

$$m = m_f + \frac{R}{w},$$

onde m e m_f são as relações de umidade após a separação e antes da separação, respectivamente; w é a gramatura e R é o reumedecimento. McDonald calculou

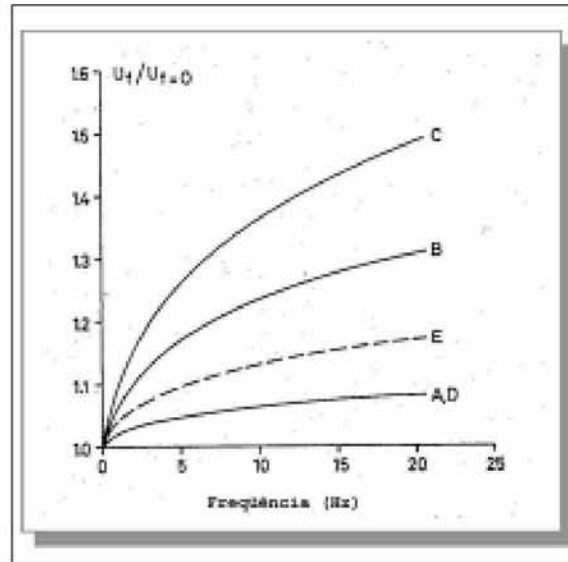


Figura 5. Relação da taxa máxima de drenagem durante pulso de pressão para a taxa de drenagem por filtração a pressão constante versus frequência do pulso [Lindberg, 1970]

em 55 g/m² o reumedecimento de uma folha de papel imprensa ocorrido com tela formadora de camada única. Contudo, seria possível suspeitar que se trata de um valor superestimado. Folhas de baixa gramatura têm porosidade mais alta (ver a seção *Gramatura*), o que pode concorrer para menor teor de sólidos após o desaguamento por sucção desde que o nível de vácuo seja suficientemente alto (ou a gramatura suficientemente baixa). O valor obtido para R não é, portanto, devido somente à separação interfacial, mas também se leva em consideração a estrutura mais grosseira (ou de maior porosidade) da folha.

Reumedecimento externo pôde ser visto somente nos ensaios que Brauns e Oskarsson [1953] realizaram em máquina-piloto de baixa velocidade, com polpa sulfito não branqueada de 55°SR de drenabilidade, quando os intervalos de vácuo eram superiores a 0,04 s. Os testes feitos por Csordas e Schiel [1977] com uma miniatura de máquina *Fourdrinier* confirmam que longos intervalos entre os pulsos pioram o desaguamento, o que indica reumedecimento externo mais alto.

Attwood [1962] fez experiências em laboratório para estudar a frequência da pulsação. Frequência mais alta resultou em melhor desaguamento. Esta ocorrência foi atribuída ao fato

de a aresta de ataque da tampa da caixa raspar água da tela. Devido a isso, o reumedecimento poderia ser diminuído consideravelmente se menos água ficasse disponível na tela. Contudo, poderia haver algum efeito de alívio de compressão das camadas da folha próximas à tela. Nestes experimentos foi utilizada uma mistura de pasta mecânica e polpa química.

Fluxo de ar

Segundo a estrutura teórica que apresentamos acima, o fluxo de ar é importante quando utilizado para deslocar a água existente nos canais da camada fibrosa. Quando um canal está aberto, um maior fluxo de ar não contribuirá sensivelmente para a remoção de água, algo claramente mostrado nas experiências de laboratório com desaguamento de hematita feitas por Hosten e Sastry [1989] (Figura 3).

Anteriormente, no setor do papel esta diferença de regimes não foi percebida com clareza, provavelmente devido à pouca espessura e às altas pressões aplicadas na folha úmida, ainda que Nordman [1954] já a tivesse registrado.

Experiências de laboratório feitas por Räisänen e Paulapuro [1995] indicam que o fluxo de ar não tem efeito significativo no desaguamento. Esses pesquisadores utilizaram folhas com

formação desuniforme e obtiveram aproximadamente o mesmo teor de sólidos, embora o fluxo de ar fosse menor nas situações de melhor formação.

Por outro lado, Brauns e Oskarsson atestam que o fluxo de ar tem efeito positivo no desaguamento. Contudo, como aumento de fluxo de ar é obtido pela elevação do nível de vácuo, fluxo de ar a vácuo constante pode até afetar negativamente o desaguamento. Isto parece estar em maior conformidade com suas próprias conclusões de serem desejáveis altos níveis de vácuo e baixos fluxos de ar.

Brauns e Oskarsson também fizeram experiências que mostram como o fluxo de ar é fundamental para a remoção de água. Teste em que a folha de papel foi coberta com lâmina de PVC – eliminando, com isso, o fluxo de ar – exibiu remoção de água muito menor, ainda que o tempo de exposição ao vácuo continuasse o mesmo (experiência, essa, feita num rolo de sucção).

Baseados em estimativas, esses pesquisadores concluíram que o fluxo de ar através da folha começa com vácuo mais baixo quando a consistência for mais alta (para consistência entre 6,5% e 7,5, com níveis de vácuo de 18 e 10 kPa, respectivamente – Figura 6). Talvez um tanto surpreendentemente, a consistência da pressão de ruptura diminuiu com o refino. Resta, porém, que as consistências foram obtidas por extrapolação, o que poderia dar margem a alguma incerteza. De fato, Brundrett e Baines [1966] mediram a pressão de ruptura em diversos tipos de papel. Assumindo-se que em uma folha de papel os canais são cilíndricos, a pressão de ruptura deveria diminuir com o diâmetro dos poros. Por este motivo, folhas feitas com massa de papel-imprensa apresentaram pressão de ruptura muito mais alta que aquela de folhas de polpa *kraft*. Atribui-se tal fato ao maior teor de finos na massa de papel-jornal. Folhas prensadas também apresentaram pressões de ruptura mais altas que aquelas de folhas nunca prensadas.

Ao que parece, o processo de consolidação faz com que a distribuição dos poros na folha seja mais uniforme. Eames e Moore também [1976] observaram, em experiências feitas com máquina-piloto de papel tipo Fourdrinier, uma pressão-limite de vácuo abaixo da qual não ocorre desaguamento.

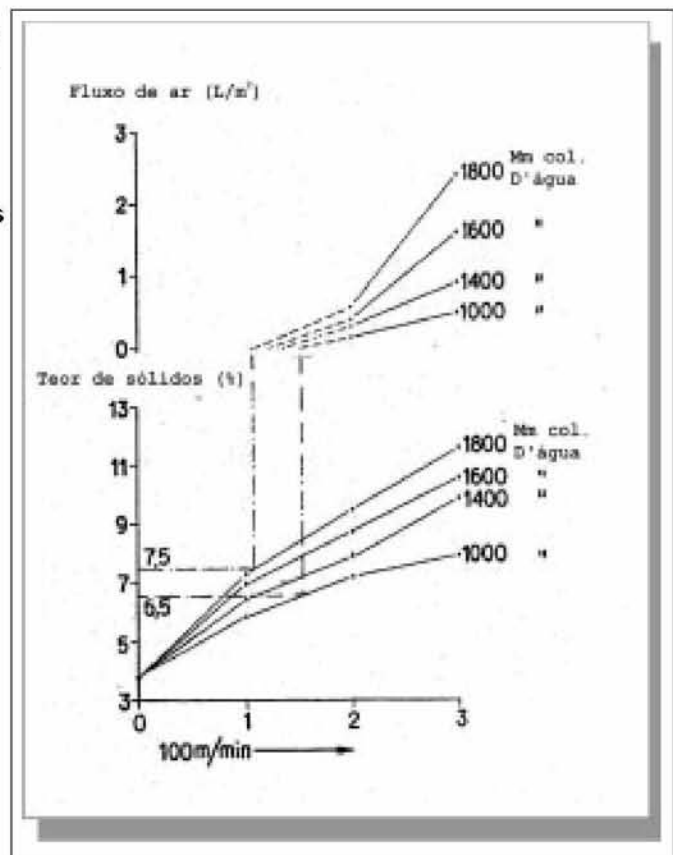
Compressão da camada de fibras

Em caixas de sucção, remove-se água principalmente por meios mecânicos, o que significa “por meio de gradiente de pressão”. O vácuo aplicado comprime a camada de fibras e gera um gradiente hidráulico na fase de água que desloca água. De fato, há dois diferentes princípios na remoção de água: pela compressão da camada de fibras e pela substituição de água por ar. (A expressão “fluxo de ar” pode ser um tanto enganosa, pois ar através de canais abertos não contribui para o desaguamento, mas flui até a face inferior da folha úmida.) Primeiro, a compressão torna acessível parte da água retida em

poros com extremidades cegas e em canais em-plano. Segundo, a substituição da água esvazia canais, onde o ar pode fluir. Por isso, há algum grau de compromisso entre compressão da camada e substituição da água. A relação ótima entre os dois casos pode ser boa indicação do ponto de compromisso.

Alguns pesquisadores têm desenvolvido experiências de desaguamento, tanto em laboratório como em máquinas-piloto, com uma membrana impermeável, para estudar somente o efeito da compressão da camada fibrosa [Brauns e Oskarsson, 1953; Brundrett e Baines, 1966; Moosavifar, 2003]. Observaram a ocorrência de um desaguamento significativo, mas menor que o verificado sem membrana colocada sobre a folha. Brundrett e Baines [1966] relatam a remoção de considerável quantidade de água estabelecendo-se uma diferença de pressão de 68 kPa e com membrana impenetrável sobre a folha úmida. Contudo, não divulgaram a quantidade de água removida.

Figura 6. Fluxo de ar e conteúdo de sólidos em seqüência de caixas de sucção [Brauns e Oskarsson, 1953]



Desaguamento com membrana permeável

São conhecidos dois estudos de experiências de desaguamentos feitos com a utilização de membrana permeável [Trasente, 1991; Lindblom e Blomqvist, 2001]. Trasente [1991] conduziu algumas experiências de desaguamento em laboratório, colocando uma membrana permeável sobre a folha úmida; Lindblom e Blomqvist [2001], por sua vez, fizeram experiências, também em laboratório, mas colocando uma membrana com microporos sob a folha úmida. Em ambos casos, o desaguamento foi melhor em comparação com o efetuado sem membrana (Figuras 7 a 9). Lindblom e Blomqvist conseguiram até mesmo um teor de sólidos tão alto quanto 50% para as gramaturas mais leves (15 g/m²) e com nível de vácuo de 70 kPa.

À primeira vista, estes resultados podem parecer um tanto surpreendentes, pois a membrana realmente reduz a pressão hidráulica disponível na folha, condição que diversos autores apontaram como de influência positiva no desaguamento (ver a seção *Vácuo*). Contudo, como anotado anteriormen-

te, a membrana posta sobre a folha melhora a compressão da camada de fibras e reduz a quantidade de água retida (ver a seção *Estrutura teórica*).

Nas experiências de laboratório feitas por Trasente, foi aplicado vácuo total (61 kPa) durante 20 s. O melhoramento no desaguamento obtido com membrana foi evidente para polpas não refinadas e refinadas até 405 CSF. Porém, para polpas altamente refinadas (202 CSF), o aumento de desaguamento ocorreu somente em folhas de 200 g/m² (Figura 7). Os resultados também indicam que o melhoramento devido ao uso da membrana cresce com a diminuição da gramatura. (O pleno vácuo, contudo, não foi constante.)

Trasente também mediu a distribuição dos poros nas folhas utilizadas em suas experiências. O melhoramento originado pela membrana foi tanto mais significativo quanto maiores eram os poros e também foi tanto mais ampla sua distribuição quanto menores eram as gramaturas e as polpas sem refino.

Em seus ensaios de laboratório para estudar a influência de duas membranas diferentes – uma metálica e outra de policarbonato – no desaguamento de folhas com diferentes gramaturas, Lind-

blom e Blomqvist aplicaram vácuo de 70 kPa durante aproximadamente 0,4 s. A membrana de policarbonato tinha poros de 0,8 µm, enquanto a metálica tinha poros com diâmetro médio de 2 µm. O desaguamento com a membrana de policarbonato foi o melhor, mas ambas contribuíram com grande aumento em desaguamento comparativamente àquele sem qualquer membrana.

Quanto mais baixas as gramaturas, melhor foi o desaguamento (Figura 9). Uma explicação possível: com gramaturas mais baixas há uma fração maior de água em fase contínua sendo drenada, o que leva a um nível mais baixo de saturação irreduzível.

Esta técnica já foi de uso em filtração mineral [Anlauf, 1988, Annon, 1988] com emprego de placas filtrantes microporosas de cerâmica para evitar o consumo de ar. A tensão superficial nos microporos é muito alta, o que restringe o fluxo de ar. A membrana microporosa pode assegurar, portanto, que o desaguamento ocorra sem (ou com um mínimo) fluxo de ar.

Temperatura

A temperatura, como já registrado, tem efeito positivo no desaguamento, o que é principalmente atribuído à diminuição da

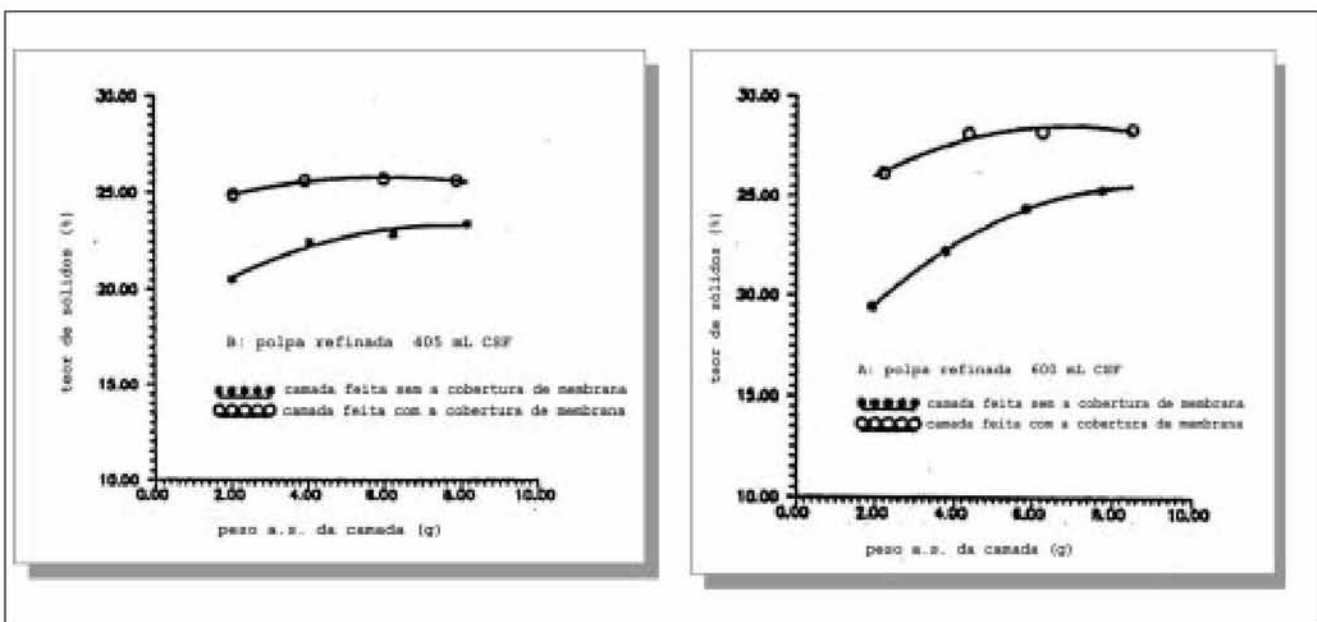


Figura 7. Esquerda: Resposta ao vácuo de polpa kraft de folhosa branqueada não refinada [Trasente, 1991]. Direita: Resposta ao vácuo de polpa kraft de folhosa branqueada e refinada até 405 CSF [Trasente, 1991]

viscosidade da água e da tensão superficial. A menor viscosidade da água contribui para desaguamento mais rápido, enquanto menor tensão superficial reduz a pressão-limite. A redução da tensão superficial também deveria concorrer para diminuir a quantidade de água retida nos canais em-plano pelo fato de a diferença de pressão aplicada poder superar mais facilmente a pressão capilar. Pode-se argumentar que provavelmente S_c diminua em toda a extensão da escala da pressão de ar.

A influência da temperatura no desaguamento foi estudada, em laboratório, por Attwood [1960] e Nordman [1954]. As experiências feitas por Nordman [1954] com pasta mecânica para papel-jornal (113 CSF) mostraram aumento de sólidos de 0,5% com o aumento de 10°C na temperatura e tempo de exposição de 0,089 s, ao mesmo tempo em que o vácuo caía 1,3 kPa. Os resultados de Attwood [1960] e Nordman [1954] mostram uma tendência linear do teor final de sólidos com a temperatura (Figura 10).

Neun e Fielding [1994] compararam

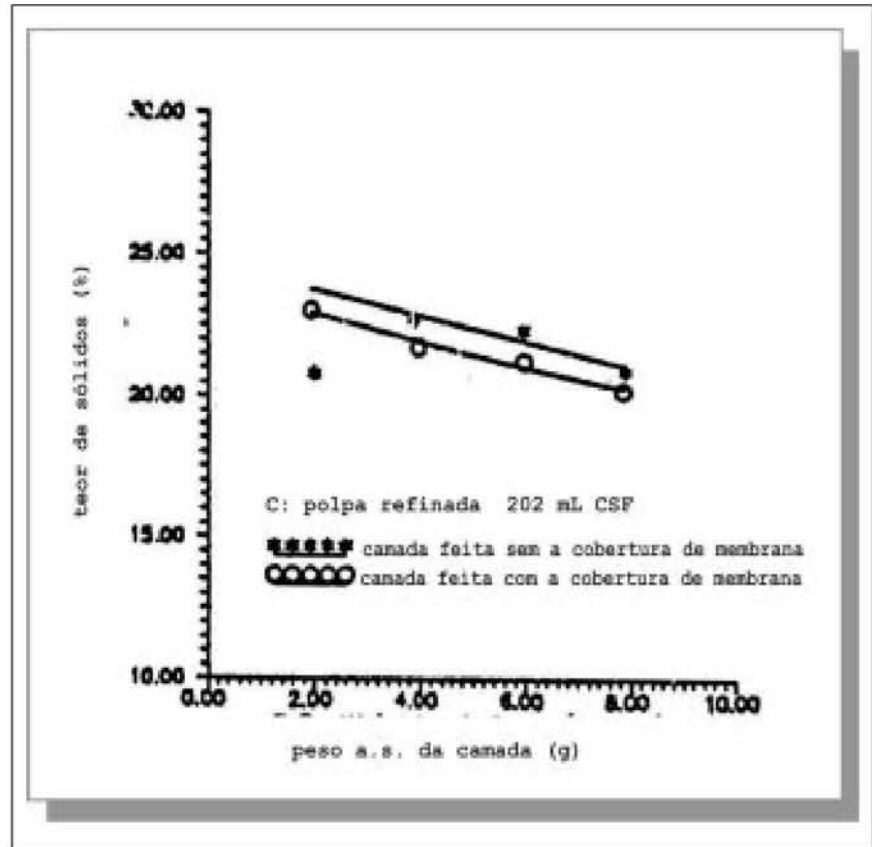


Figura 8: Resposta ao vácuo de polpa kraft de folhosa branqueada e refinada até 202 CSF [Trasente, 1991].

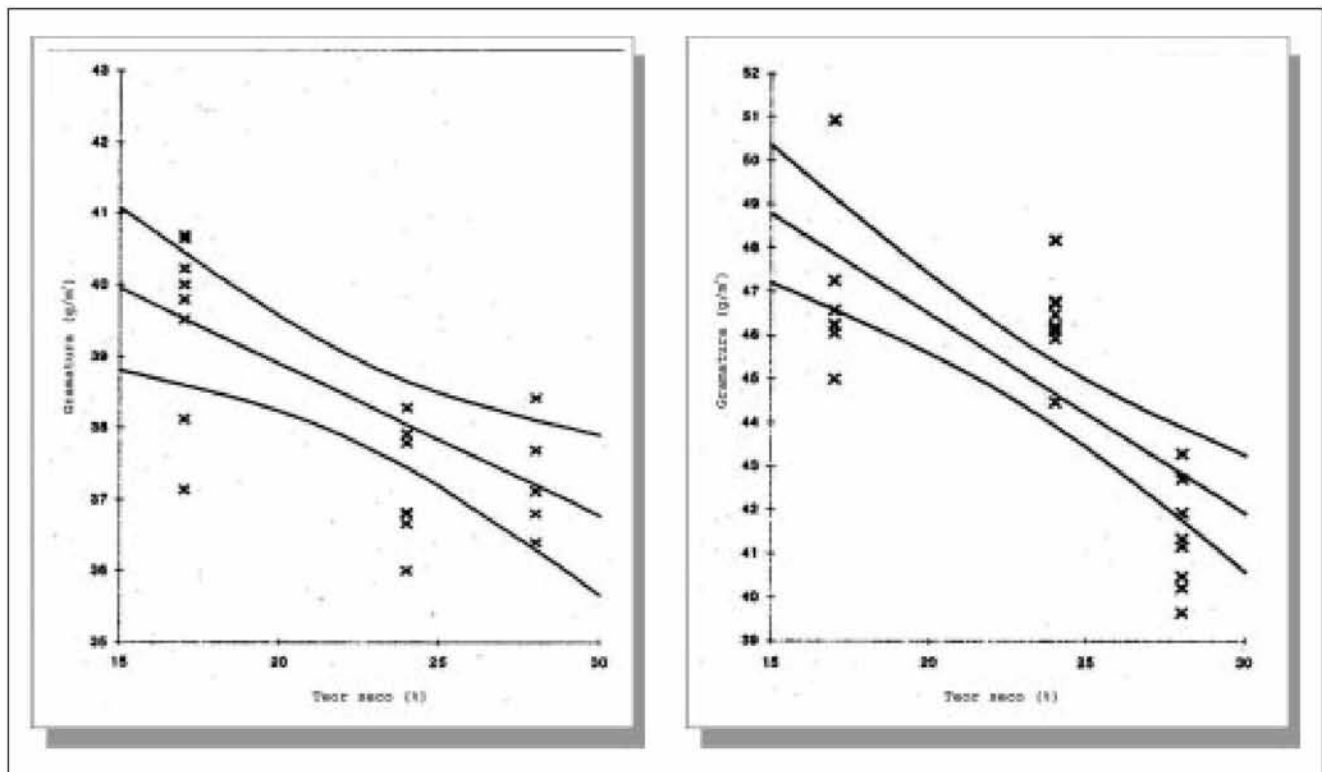
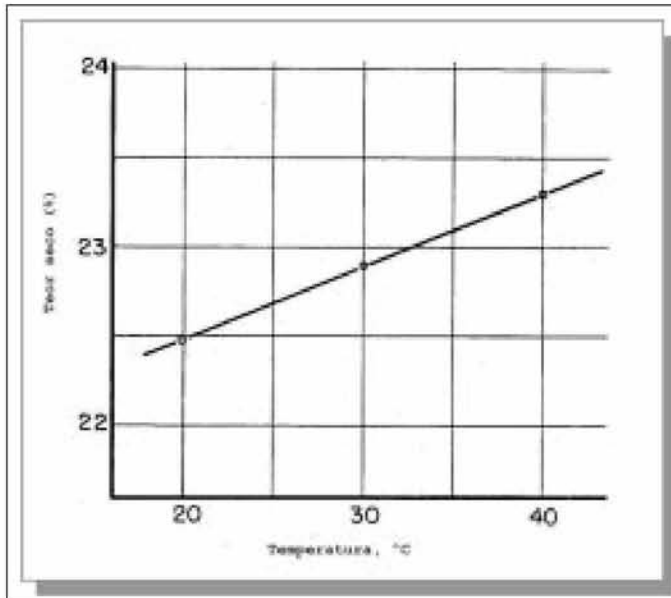


Figura 9. Esquerda: Mudança no teor de sólidos após desaguamento com membrana de policarbonato posta sob a folha, para diferentes gramaturas [Lindblom e Blomquist, 2001]. Direita: Mudança no teor de sólidos após desaguamento com membrana metálica posta sob a folha, para diferentes gramaturas [Lindblom e Blomquist, 2001]

Figura 10.
Efeito da temperatura no desaguamento de pasta mecânica [Nordman, 1954]



resultados de laboratório com dados coletados em máquinas de papel, concluindo que a temperatura tem efeito importante no desaguamento.

A evaporação tem sido considerada negligenciável por vários pesquisadores, mas este efeito pode, contudo, ter participação importante no abaixamento da temperatura [Karilla e Räisänen, 1992].

Estrutura da folha

As propriedades da massa, como mencionado, têm influência determinante no desaguamento. Com base na exposição teórica feita anteriormente, parece haver uma regra pertinente à estrutura da camada: diminuição da porosidade resulta em melhor grau de desaguamento, desde que o nível de vácuo esteja acima de determinado valor (de modo a ser possível atingir a saturação irreduzível). Portanto, gramatura, compressão da folha e fração de finos deveriam influenciar positivamente o grau de desaguamento, desde que com aplicação de vácuo suficientemente alto. Regra geral, estas modificações reduzem o tamanho médio dos poros e causam sua menor distribuição. Portanto, se o tamanho médio dos poros resultar demasiadamente pequeno, a pressão aplicada será, por fim, insuficiente para atin-

gir a pressão-limite para uma grande quantidade de água, o que iria piorar o desaguamento; em outras palavras, S_0 aumentaria. Isso é confirmado pe-

las experiências de laboratório de Britt e Unbehend [1980], que indicam que este comprometimento, para celulose sulfito, acontece quando a polpa está com 35 mL CSF para vácuo de 74,5 kPa (Figura 11).

Com isso, no que se refere à estrutura, a utilização dos dados da Figura 3 deve ser feita com cuidado. Na indústria de papel há, normalmente, preocupação com o teor de sólidos, dado que mostra o nível do equilíbrio de saturação. Por isso, deveria ser feita uma correção para a diminuição da porosidade.

Ainda que a extensão do desaguamento possa aumentar com a gramatura, a compressão da folha e a fração de finos, espera-se destes fatores decréscimo no índice de desaguamento – o menor diâmetro dos canais aumenta a resistência ao fluxo.

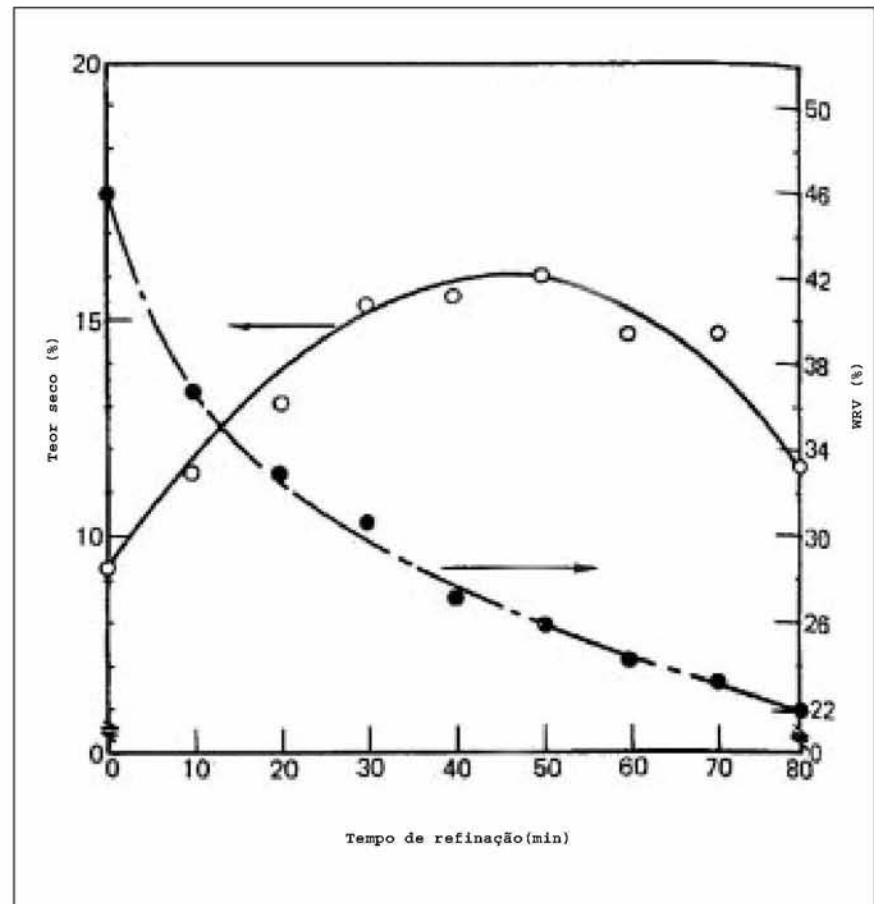


Figura 11. Conteúdo de sólidos após vácuo e retenção de água (WRV) como função da extensão do refino [Britt e Unbehend, 1980]

FINOS E CARGAS MINERAIS

Britt e Unbehend [1980] usaram um longo tempo de exposição ao vácuo (20 s). Ainda assim, estudaram a extensão do desaguamento e obtiveram o nível de equilíbrio de saturação. Como exposto anteriormente, seus resultados mostram que há um nível ótimo de finos relativamente ao desaguamento, condição em que a folha é apropriadamente consolidada. Resultados de Trasente [1991] também mostram que com refinação há aumento na extensão do desaguamento para a menor gramatura estudada (200 g/m²). (Nestes ensaios, a camada de fibras foi submetida ao vácuo total disponível, que resultou em diferentes quedas de pressão através das folhas.)

Nordman [1954] realizou experiências de desaguamento em laboratório com curto tempo de exposição ao vácuo (até 0,12 s) e aplicação de pressão variada. Sob essas condições, o autor informa diminuição monotônica da secagem com o aumento do refino. Estes resultados são confirmados por Räsänen e Paulapuro [1994], que também mostram diminuição do índice de desaguamento com o refino. O tempo máximo acumulado de exposição foi de aproximadamente 0,4 s com pressão de 20 e 50 kPa. Em condições parecidas, Mitchell e Johnson [2000] obtiveram resultados semelhantes. Por sua vez, testes de Räsänen e Paulapuro [1995] feitos com tempos de exposição de aproximadamente 0,14 s e pressão de 40 kPa indicaram que o aumento do conteúdo de carga mineral diminui o teor de sólidos. A maior fração de carga foi obtida mediante adição de auxiliares de retenção, que deu vez a uma camada de fibras mais frouxa – o fluxo relativo de ar aumenta com a fração de finos.

Testes de laboratório feitos com pasta mecânica mostram uma clara influência da quantidade de fragmentos de fibras no desaguamento de curto tempo de exposi-

ção (0,089 s) (Figura 12).

Neun [1995] estudou, em máquina-piloto, a influência do tipo de massa no processo de desaguamento. Utilizou polpas virgem e reciclada – com a diferença entre as polpas caracterizada pelo grau de drenabilidade (que foi de 650 e 450 CSF, respectivamente) –, e folhas com 127 e 210 g/m². Os resultados mostram que a polpa de drenabilidade mais alta deságua muito mais rapidamente, mas o nível de secagem não parece mudar.

A pulsação piora a retenção e faz a distribuição dos finos mais desuniforme [Räsänen e Paulapuro, 1995]. Foram necessárias frequências acima de 80 pulsos por segundo para se obterem folhas semelhantes àquelas produzidas

num *Fourdrinier* com sua tela formadora em movimento. Os estudos também concluíram que é a frequência da pulsação, e não o efeito do foil, que causa a mudança na distribuição de finos.

Tipos de polpa. As polpas químicas e mecânicas diferem em muitos aspectos: as pastas mecânicas têm maior fração de finos (normalmente refletida em seus baixos valores de CSF), suas fibras são mais curtas, e é mais rígida e mais hidrofóbica devido à presença de lignina. Todos estes fatores influenciam o desaguamento numa variedade de formas bastante específicas, a depender das condições de processo, o que faz da análise da influência do tipo de polpa no desaguamentos

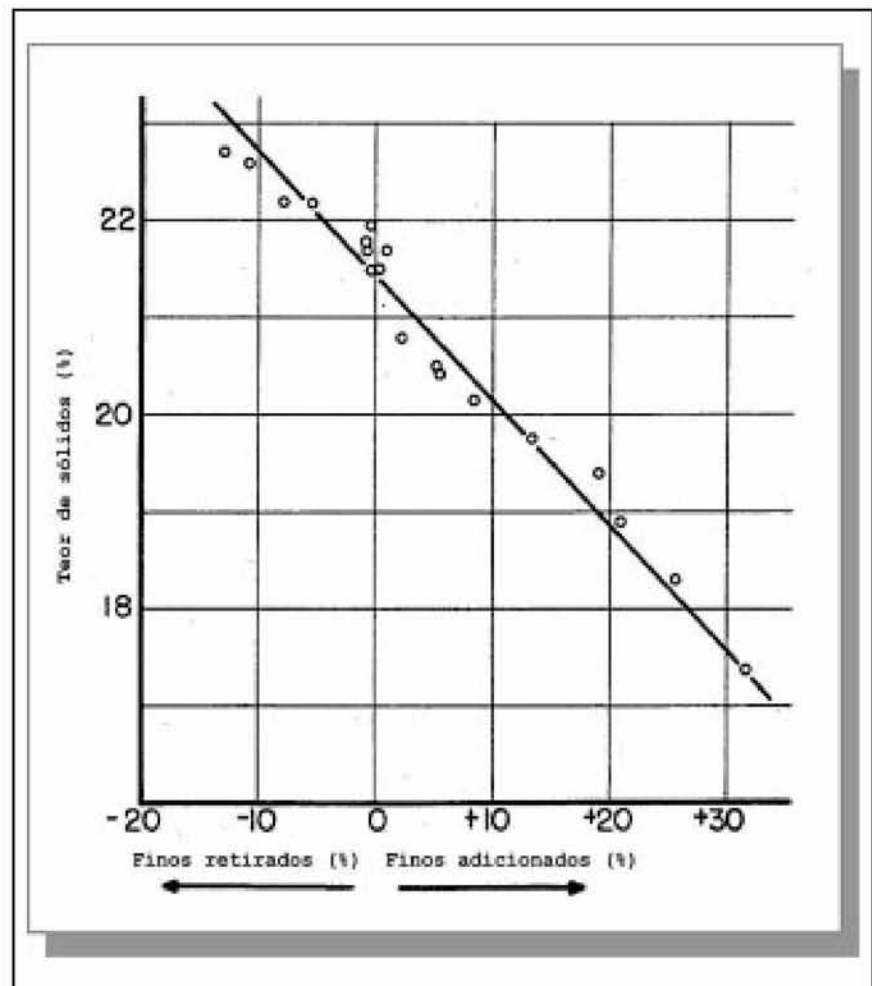


Figura 12. Efeito dos finos no desaguamento de pasta mecânica (79 CSF). O tempo de exposição foi de 0,089 s [Nordman, 1954]

a vácuo um campo de pesquisa muito amplo. Não surpreende que a caracterização das polpas com o subsídio de um único fator, tal como a drenagem, não possa, por si só, descrever o comportamento do desaguamento em caixas de sucção. Por exemplo, para um mesmo grau de drenagem, Nordman [1954] obteve teor de sólidos mais alto em pasta mecânica do que em polpa sulfito (Figura 13, esquerda). Nordman [1954] também relatou que a adição de polpa química a pasta mecânica é meramente cumulativa.

• Gramatura

Alterações no desaguamento conforme aumente a gramatura podem ocorrer devido a dois fatores: a menor distribuição do tamanhos dos poros e o *efeito membrana*. Folhas mais espessas têm fração maior de material fino, que leva a menor distribuição do ta-

manhos dos poros [Trasente, 1991] e, conseqüentemente, a menor porosidade sob a mesma força de compressão.

O *efeito membrana* poderá ser compreendido mais facilmente se o aumento da gramatura for visto como uma membrana colocada sobre a folha inicial. Em sintonia com esta interpretação, os resultados esperados de um aumento de gramatura deverão se assemelhar àqueles decorrentes de desaguamento com membrana de cobertura. Em baixos níveis de vácuo, a intensidade do desaguamento deveria diminuir, sendo de se esperar o oposto em altos níveis de vácuo. Por sua vez, a taxa de desaguamento deveria diminuir sempre que houvesse aumento da gramatura. Outra conclusão, derivada desta interpretação, seria que o melhoramento do desaguamento com membrana em folhas de gramatura alta deveria ser menos pro-

nunciado que aquele em folhas de gramatura baixa.

Nas experiências de laboratório de Trasente [1991], o grau de desaguamento aumentou em polpas não refinadas ou refinadas até aproximadamente 400 CSF, mas diminuiu em polpas refinadas intensamente (cerca de 200 CSF), para duas massas diferentes (Figura 7 e Figura 8). Porém, o nível de vácuo não foi constante em todas as experiências.

Conforme Räsänen e Paulapuro [1994, 1995] e Räsänen [2000], folhas de gramatura mais alta atingem teor de sólidos mais alto com elevados níveis de vácuo, embora levem mais tempo para chegar ao conteúdo final de sólidos (Figura 14). Isso, porém, não é confirmado por Cagnon e Neun [1996] e Neun [1995], os quais afirmam que folhas mais pesadas não podem ser desaguadas com a mesma intensidade que folhas mais leves,

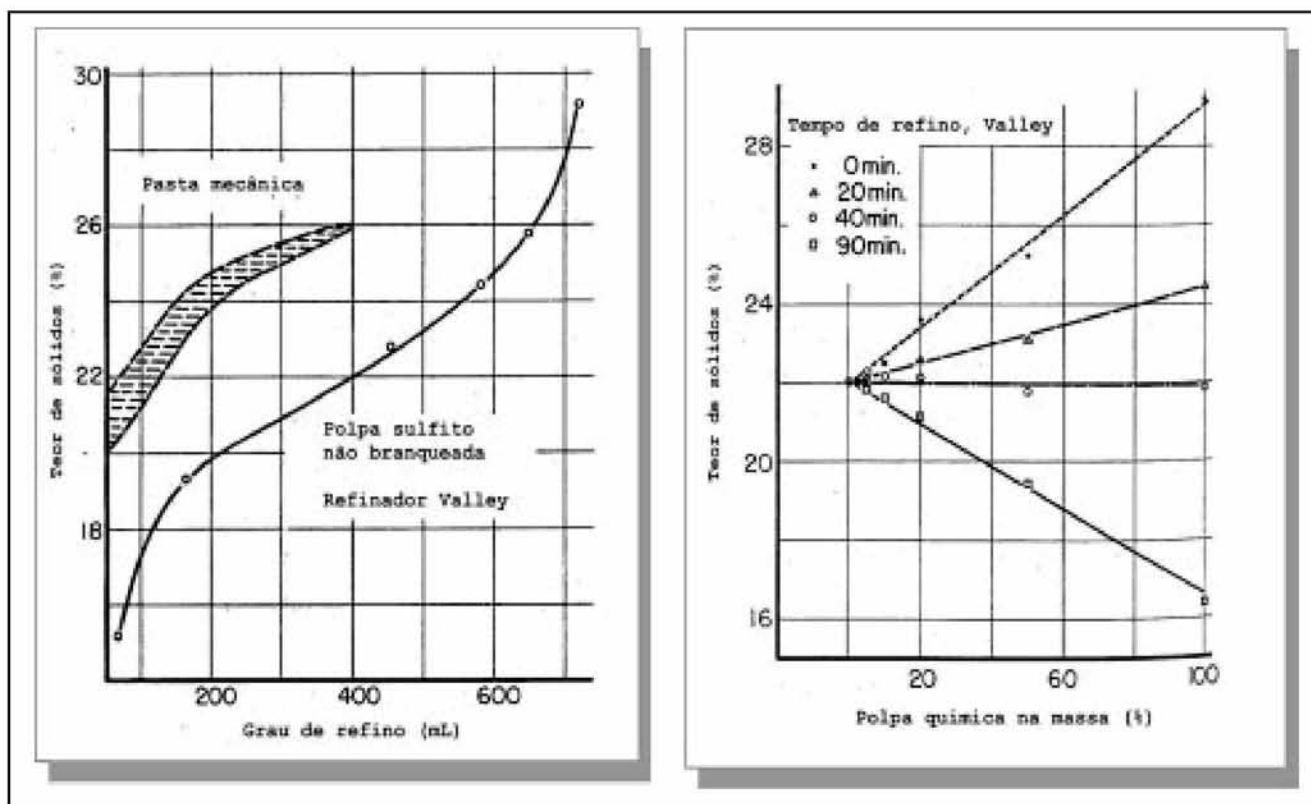


Figura 13. Esquerda: Efeito do refino (caracterizado pelo grau de drenagem) no desaguamento [Nordman, 1954]. Direita: Efeito da adição de quantidades variadas de polpa química no desaguamento [Nordman, 1954]

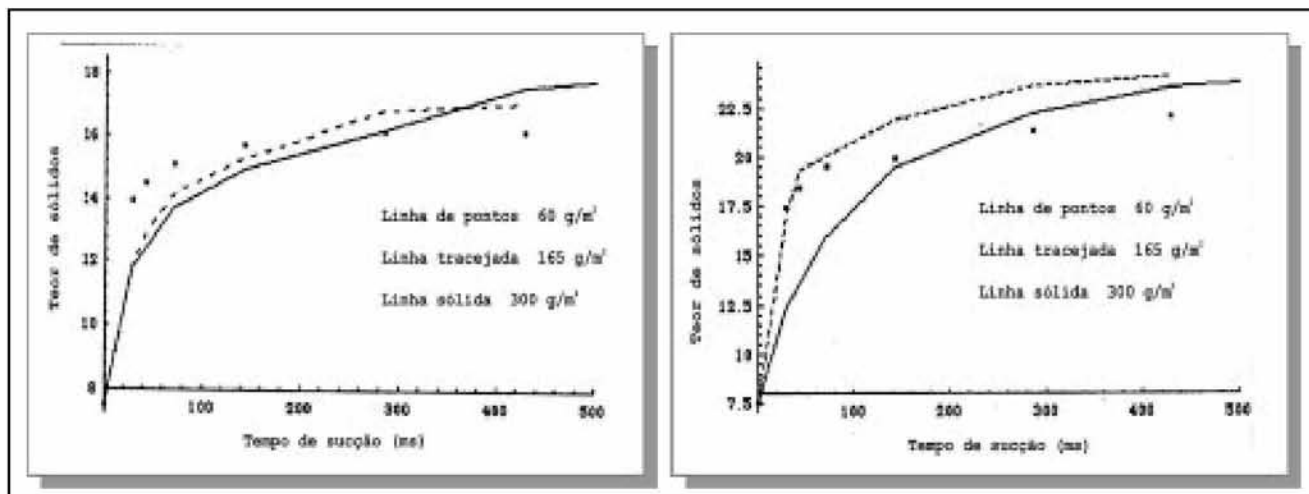


Figura 14. Esquerda: Efeito da gramatura na extensão e taxa de desaguamento em polpas kraft branqueadas submetidas a vácuo de 20 kPa [Räisänen e Paulapuro, 1994]. Direita: Efeito da gramatura na extensão e taxa de desaguamento em polpas kraft branqueadas submetidas a vácuo de 50 kPa [Räisänen e Paulapuro, 1994]

não importando o tempo de residência – gramaturas altas a requerer níveis de vácuo altos para atingir a mesma consistência. Esta discordância pode ser devida a conclusões de Neun influenciadas por seu modelo de extrapolação do teor final de sólidos.

Nordman [1954] estudou o desaguamento somente numa extensão de tempo de exposição muito curto; seus resultados mostram um teor de sólidos maior em gramaturas mais leves. Isso, contudo, não ajuda a decidir se o conteúdo final de sólidos (ou a extensão do desaguamento) aumenta também com o aumento da gramatura.

• Atrito e tela formadora

Alguns aspectos negativos das caixas de sucção, como a abrasão contínua da tela, a carga na cobertura e o aumento na tensão de tração, são consequência direta da fricção entre a tela as tampas das caixas.

Eames e Moore [1976] informaram que, em sua máquina-piloto, a fricção nas caixas de sucção aumentou aproximadamente com o quadrado do vácuo aplicado. O atrito é maior em caixas que operam com consistências mais altas. Isso é atribuído à ação do filme lu-

brificante de água entre tela e superfície da tampa, que é maior com consistências mais baixas.

• Água branca

Dados de Eames e Moore [1976] comprovam que o teor de sólidos na água branca que entra na caixa de sucção não se altera com aumento do vácuo. Neste caso, o teor de sólidos na água de entrada era de 9,2%. Para caixas de sucção úmida, com o aumento do vácuo acontece redução no teor de sólidos da água branca. Isso foi atribuído ao melhor efeito de filtração a alto vácuo, condição em que a camada de fibras próxima à tela está mais compacta.

MODELAÇÃO

O desenvolvimento de modelos quantitativos para a seção de desaguamento a vácuo é questão complexa devido às dificuldades para descrição a conjunta dos variados fenômenos envolvidos. De fato, até 1996 Räisänen não pôde encontrar qualquer modelo de desaguamento em máquina de papel baseado nas leis dos fluidos através de meios porosos. Räisänen atribuiu o fato a algumas complicações que ocorrem no processo: a grande desigualdade em visco-

sidade entre ar e água – que causa o efeito *fingering*, não facilmente modelado – e a dificuldade de se obterem dados de compressibilidade da camada, ou trama, de fibras. Em consequência, para estimar e otimizar o sistema de desaguamento a vácuo, foram utilizadas curvas de ajuste deste processo de drenagem.

Entretanto, mais tarde foram propostos alguns modelos do desaguamento em caixas de sucção [Ternopol'skaya, 1998; Jones, 1999; Kawka, 2001; Mitchell e Johnson, 2001] baseados na Física. Existem, também, outros modelos desenvolvidos para fins diversos com base na Física, como o desaguamento mineral e a prensagem úmida, que consideram os fenômenos fundamentais que acontecem numa caixa de sucção [Wakeman, 1979a, b; Kataja *et al.*, 1992; Gustafsson e Kaul, 2001].

Devido às dificuldades para a obtenção das permeabilidades relativas a fluxos de ar e água em meios parcialmente saturados e para determinação de outros parâmetros relevantes, van Brakel e van Rooijen [1984] acharam mais oportuno utilizar abordagens empíricas em vez de modelação mais sofisticada com base em princípios da Física.

Nesta seção, são apresentadas as idéias centrais relativas a curvas de ajuste e abordagens da modelação com bases empírica e física, seguidas de argumentação quanto a suas vantagens, pontos fortes e pontos fracos.

· Curvas de ajuste

Curvas de ajuste são normalmente fundamentadas em experiências de laboratório ou em máquinas-piloto e podem ser de auxílio na otimização de níveis de vácuo e tempos de exposição para determinada condição de processo, em conformidade com a qual foram feitas as experiências. Essas, entretanto, não podem contribuir para o entendimento dos fenômenos que se passam numa caixa de sucção e são muito limitadas às condições estudadas nas experiências.

Neun e Fielding [1993, 1994] propuseram-se a desenvolver um modelo para prever os efeitos do desaguamento das caixas de sucção planas, a fim de possibilitar a otimização de vácuo, fluxo de ar, geometria das caixas e arrastes da tela. Fizeram testes para estu-

dar o desempenho do desaguamento de uma caixa de sucção em função da potência do vácuo, tempo de exposição ao vácuo e teor de sólidos na entrada. Eles formataram o comportamento observado com a seguinte função:

$$y = b + m \cdot \tanh(c\Delta t),$$

onde m e c são parâmetros do modelo e devem ser ajustados a cada nível de vácuo e a tipo de polpa. Neun e Fielding [1993] afirmam que para cada vácuo é obtido um teor de sólidos assintótico independente do tempo de residência, embora não exibam esta tendência assintótica.

Os pesquisadores também demonstram como utilizar as curvas preparadas para os diferentes níveis de vácuo a fim de estimar o teor de sólidos de uma folha passada sobre uma seqüência de caixas de sucção com níveis de vácuo crescentes. Esse procedimento é ilustrado na Figura 16. Cada curva é acompanhada pelo tempo em que a folha esteve exposta ao vácuo dado. O teor final de sólidos desta curva é, então, utilizado como

entrada da curva seguinte, de nível de vácuo mais alto.

Räisänen [1996] e Räisänen e Paulapuro [1994] acreditam que o rápido aumento do teor de sólido no início da aplicação do vácuo decorre da compactação da folha, enquanto a drenagem devida ao fluxo de ar que arrasta alguma água através da folha seria um tanto mais lenta. Portanto, a forma do segundo termo no lado direito da equação é inspirada em material de comportamento viscoelástico de primeira ordem. A segunda parte como uma constante proporcional ao tempo de exposição:

$$C = C_0 + b(1 - e^{t/\tau}) + d \cdot t,$$

onde C_0 é o teor de sólidos antes da aplicação de vácuo de 10 kPa e t é o tempo necessário para se obter alteração para 63% de b . Salienta-se o caráter assintótico das curvas de desaguamento, que muitas pesquisas apontam como consequência do curto tempo de exposição [Räisänen, 1996]. Os parâmetros do modelo são calibrados para cada condição de processo.

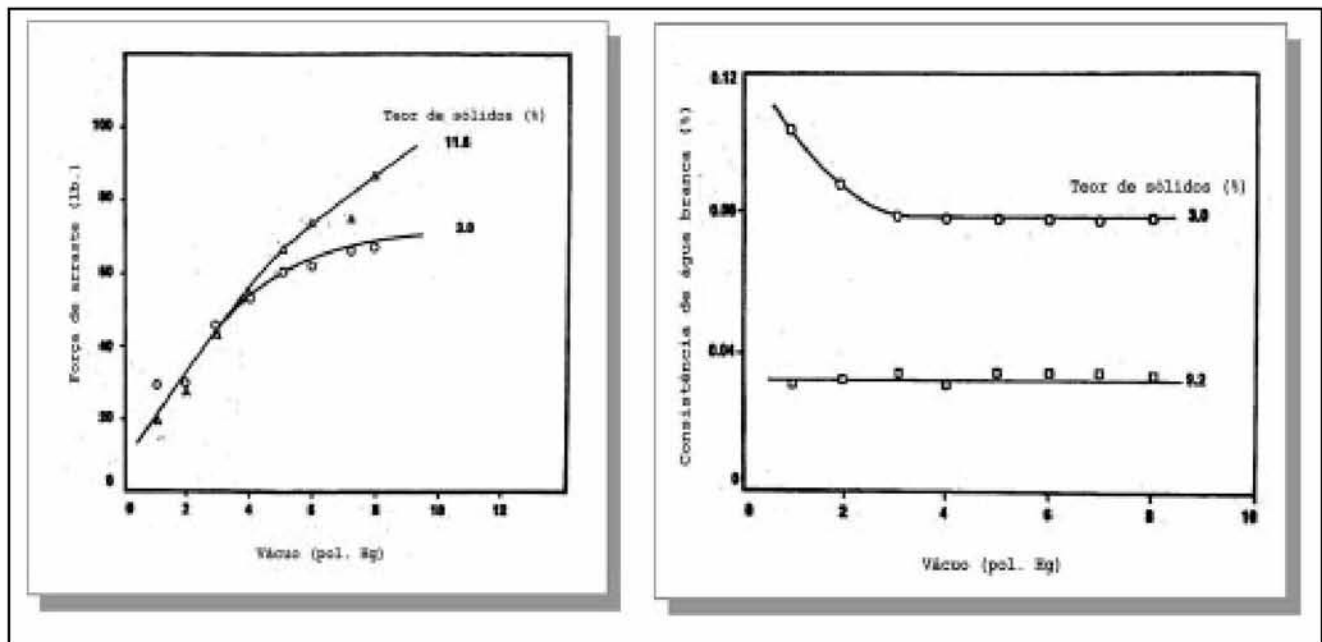


Figura 15. Esquerda: Força de arraste necessária para diferentes níveis de vácuo e dois teores de sólidos da folha [Eames e Moore, 1976]. Direita: Consistência da água branca referida a diferentes níveis de vácuo e dois teores de sólidos da folha [Eames e Moore, 1976]. Conforme Neun [1996], todos os trabalhos anteriores têm indicado que, ao final do formador, os efeitos da tela no desaguamento foram insignificantes.

• Abordagem empírica

Nas abordagens empíricas, o equilíbrio de saturação das camadas é determinado com o auxílio do número capilar, N_{Cap} , ou seja:

$$S_e = const \cdot N_{Cap}^\alpha$$

Como já foi salientado, o equilíbrio de saturação fornece a extensão do desaguamento para uma dada porosidade e depende da intensidade do vácuo aplicado, da camada e das propriedades do líquido.

O número capilar é um grupo não-dimensional que expressa a relação das forças que retiram o líquido da camada para as forças capilares que retêm o líquido na camada. Desconsiderando-se as forças da gravidade, pode ser definido como [Wakeman, 1979a, b]:

$$N_{cap} = \frac{\phi^3 d^2 \Delta P}{(1 - \phi)^2 L \gamma}$$

onde ϕ é a porosidade da folha, γ é a tensão superficial, d é o diâmetro médio das partículas, L é a espessura da camada e ΔP é a pressão aplicada.

Para o equilíbrio de saturação, S_e , de camadas de diferentes materiais particulados desaguadas a vácuo, alguns autores têm proposto correlações empíricas diferentes [Dobrowski e Browdell, 1954; Wakeman, 1979a, b; Hosten e Sastry, 1989]. Não há, pelo visto, uma correlação universal que descreva diferentes materiais S_e e resultados para papel deveriam, portanto, ser baseados em dados experimentais originados de folhas de polpa de madeira.

Para diferenças da pressão aplicada, que seja menor que a *pressão-limite*, não há remoção de água e nenhum ar penetra na folha. Generalizando a aplicação da equação de Young-Laplace a sistemas de capilares, a pressão-limite pode ser determinada por Wakeman [1976]:

$$P_{th} = \frac{k(1 - \phi)\cos\theta}{\phi d}$$

onde k é o coeficiente.

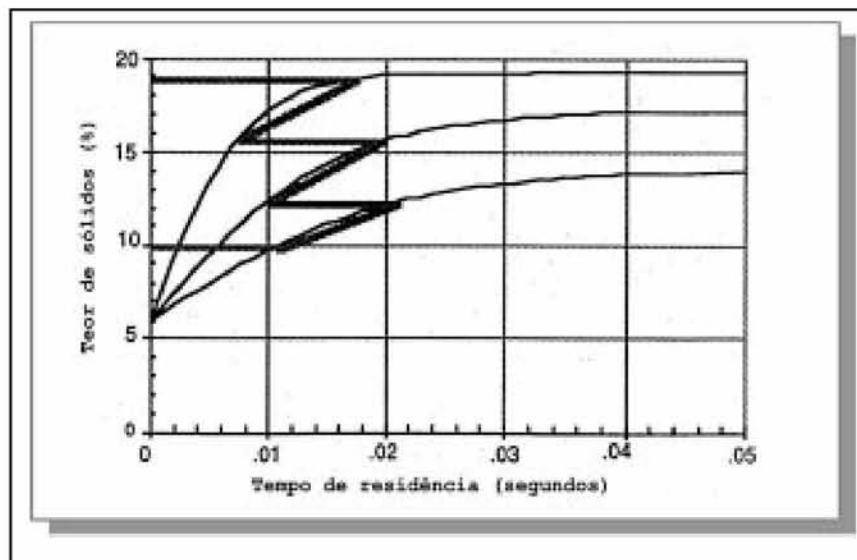


Figura 16. Otimização do desaguamento a vácuo [Neun e Fielding, 1994]

Comportamento dinâmico. Foi anteriormente analisado o comportamento de diferentes folhas úmidas na condição de equilíbrio, quando o desaguamento quase pára. A condição de equilíbrio é de máxima relevância para determinar a extensão do desaguamento, enquanto a descrição dinâmica se faz necessária para definir a taxa de desaguamento e, conseqüentemente, dimensionar o tamanho das caixas de sucção. Normalmente, as caixas de sucção são desenhadas de modo a quase alcançar o teor assintótico de sólidos [Gardiner, 1978]. Daí a importância de se conhecer a taxa de desaguamento.

Aplicando-se a equação de Washburns – que descreve a penetração de um fluido umectante em capilares – a um grupo de canais não-interativos, Hosten e Sastry [1989] formularam a expressão não-dimensional, que segue:

$$N_H = \frac{\phi}{L(1 - \phi)S_V} \left(\frac{P^*}{\mu} t \right)^{1/2}$$

em que S_V é área superficial específica dos sólidos e P^* é a diferença entre o vácuo aplicado e a *pressão-limite*.

Seus resultados se situam em uma única curva entre a saturação de cor-

relação e o número não-dimensional indicado em (12). Por isso, pode-se argumentar que deveria existir uma correlação empírica entre a saturação da camada e o número proposto.

• Modelos dos efeitos fundamentais

Como exposto antes – no processo de desaguamento a vácuo –, a aplicação do vácuo é causa de dois fenômenos fundamentais na fabricação de papel: a consolidação da folha e a remoção mecânica de água. Adicionalmente, são essenciais para a correta projeção da extensão do desaguamento e taxa. Os modelos físicos desenvolvidos até agora foram bem-sucedidos em descrever esses efeitos em diferentes graus. Alguns desses modelos são apresentados aqui, acompanhados de sugestão quanto a um possível próximo passo na descrição do desaguamento a vácuo.

Modelos para a seção de prensas baseados em princípios da Física têm sido usados, em várias ocasiões, para auxiliar no entendimento do desaguamento a vácuo [Räisänen e Paulapuro, 1995]. No geral, esses modelos têm como desvantagem o fato de que o fluxo de ar para a prensagem não é tão fundamental quanto para o processo a vácuo. Além disso, no desaguamento a vácuo o nível de sa-

turação vai desde uma condição de completa saturação por água (frequente) até a condição de saturação irreduzível, ao passo que a folha pode ser considerada quase saturada ao longo de todo o processo de prensagem.

Para explicar a influência da pulsação no desaguamento a vácuo, Räsänen e Paulapuro [1995] utilizaram o modelo de Jönsson e Jönsson [1992].

O modelo de uma só fase apresentado por Jones [1999] introduziu uma restrição de desaguamento para poros pequenos, um procedimento mais simples de introduzir uma parte característica complexa do fluxo de duas fases num meio poroso (ver a seguir). Contudo, este modelo não pode descrever uma melhor remoção de água mediante desaguamento com membrana, por exemplo, pois a introdução de uma membrana levaria a poros ainda menores associados a pressão hidráulica mais baixa.

O modelo da prensagem sugerido por Kataja *et al.* [1992] considera tanto a consolidação da folha como o fluxo de duas fases. Um modelo para a drenagem a vácuo muito semelhante foi

apresentado por Mitchell e Johnson [2001]. Como estes modelos foram originalmente desenvolvidos para a prensagem, normalmente operada a altos níveis de saturação, não reprimem a remoção de água no nível de saturação irreduzível. Em consequência, estes modelos também não podem descrever os resultados dos melhoramentos na remoção de água obtidos por desaguamento com membrana e a altas gramaturas.

Gustafsson e Kaul [2001] e Gustafsson *et al.* [2001] desenvolveram e validaram um modelo da seção para prensagem úmida. Este modelo considera ambos – consolidação e fluxo de duas fases –, mas, ainda assim, tem as mesmas limitações dos modelos desenvolvidos para a prensagem. Uma vantagem deste desenho: as funções de permeabilidade e compressibilidade foram desenvolvidas e validadas separadamente, de modo a evitar que uma má função da compressibilidade seja compensada pela descrição da permeabilidade. Além disso, o modelo de Gustafsson e Kaul é o único com descrição validada de compressibilidade

taxa-dependente da camada de fibras.

Evidentemente, as equações de compressibilidade e permeabilidade são apropriadas às condições normalmente encontradas na seção de prensas, e uma adaptação às operações de desaguamento a vácuo irá requerer que aquelas funções sejam estimadas para as condições do processo com vácuo.

Wakeman [1979a, b] desenvolveu um modelo para o desaguamento de camadas incompressíveis que é muito semelhante ao modelo apresentado por Tarnopolskaya [1998]. A vantagem destes modelos está no fato de que consideram o nível de saturação irreduzível. O que isso significa para a permeabilidade relativa é mostrado na Figura 17 (direita). Nesses modelos, permeabilidade é função da saturação reduzida, SR , que assegura o desaparecimento da permeabilidade da água quando a saturação atinge o nível do equilíbrio de saturação. Com isso, estes modelos predizem um valor assintótico real para a folha, pois modelos sem esta limitação iriam predizer uma folha completamente seca quando exposta ao vácuo por longo tempo.

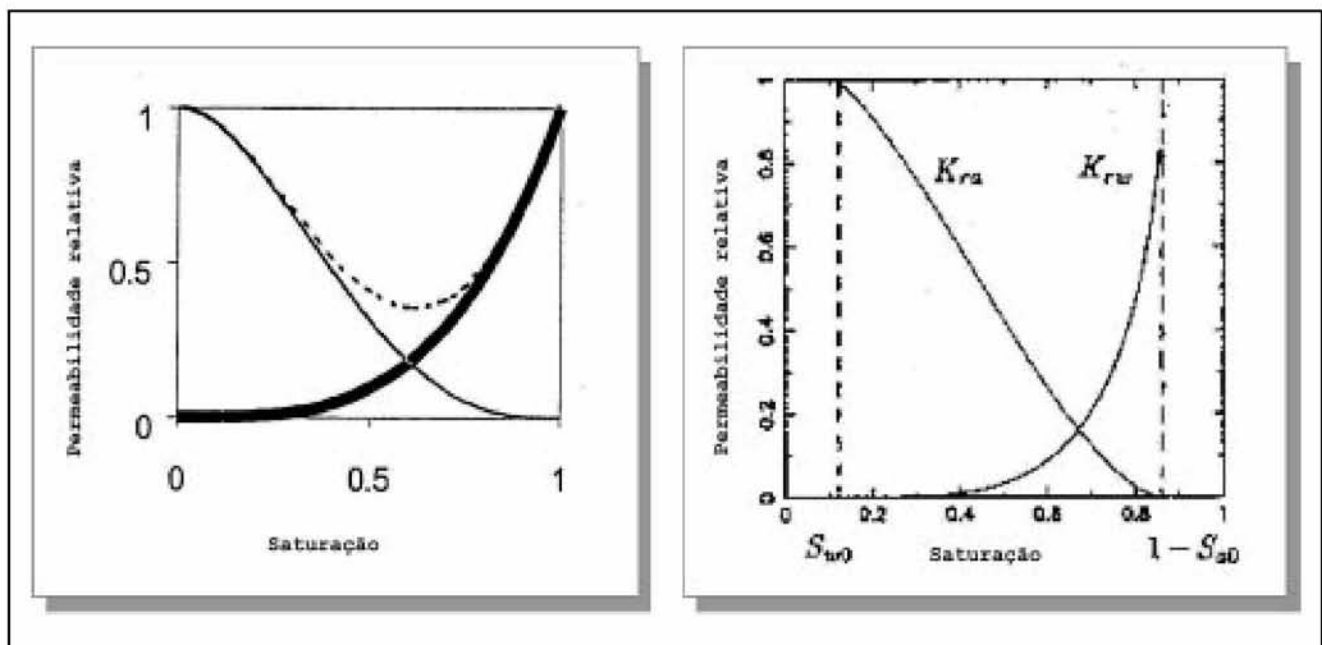


Figura 17. Esquerda: Permeabilidades relativas para ar e água como função da saturação por água [Mitchell e Johnson, 2001]. Direita: Permeabilidades relativas para ar e água como função da saturação por água [Tarnopolskaya, 1998].

É pena que os únicos modelos a considerar o nível de saturação irreduzível negligenciem a compressão da folha. Estas duas partes são necessárias para possibilitar a predição do melhoramento na extensão do desaguamento que resultaria de processamento com membrana e alta gramatura.

Kawka [2001] publicou, recentemente, um modelo matemático do processo de desaguamento a vácuo juntamente com sua validação. Este modelo é de conceito ligeiramente diferente dos outros por assumir que as concentrações de ar, água e fibras são constantes na direção da espessura. Por isso, este modelo não é adequado à descrição de casos nos quais os gradientes internos sejam relevantes, ou seja, de desaguamento com altas gramaturas e membrana.

OBSERVAÇÕES CONCLUSIVAS

Foi apresentada uma estruturação teórica que poderia explicar as experiências realizadas no campo do desaguamento a vácuo e habilitar à especulação sobre quais possíveis resultados estariam, eventualmente, fora do âmbito já experimentado.

Dois fenômenos fundamentais que acontecem nas caixas de sucção – a compressão da camada de fibras e a remoção de água mediante ar – são essenciais ao entendimento dos dados experimentais disponíveis. A compressão da camada de fibras dá origem a poros menores ou canais que contribuem para desaguamento potencialmente maior, visto que o nível de saturação irreduzível – a saturação em que nenhuma água adicional pode ser removida por fluxo de ar a dada pressão de vácuo – não muda sensivelmente nas condições típicas de desaguamento a vácuo. Por outro lado, a taxa de drenagem diminui com a compressão da camada de fibras.

Nenhum dos modelos de desaguamento a vácuo revisados da literatura apresenta as propriedades essenciais para descrever o processo. Existem, por-

tanto, ambas, a falta e a necessidade de uma descrição detalhada do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

H. H. ANLAUF. Continual filtration without air consumption - new Intermedia for the separation of suspension. In XIV Int Miner Process Congr, Amsterdam, 1988. Elsevier.

ANNON. Ceramics II Iter vacuum. World Mining Equipment, 1988. 12.

M. C. ASENSIO AND J. SEYED-YAGOOBI. Determination of the capillary pressure function for paper using centrifugation data. In Engineering Conference, San Francisco, USA, 1994.

B. W. ATTWOOD. A laboratory investigation of dynamic drainage at vacuum boxes. Pulp and Paper Magazine of Canada, 61(C):T97{103, 1960.

B. W. ATTWOOD. A study of vacuum boxes operation. Paper Technology, 3(5): 446{456, 1962.

O. BRAUNS AND R. OSKARSSON. Om avvattning och luftgenomströmning vid suglador och sugvals. Svensk papperstidning, 56(18):691{696, 1953. In Swedish.

K. W. BRITT AND J. E. UNBEHEND. Water removal during sheetformation. Tappi Journal, 63(4):67{70, 1980.

L. E. BROWNELL AND D. L. KATZ. Flow of fluids through porous media { part ii. Chem Eng Prog, 43:601{612, 1947.

E. BRUNDRETT AND W. D. BAINES. The flow of air through wet paper. Tappi Journal, 49(3):97{101, 1966.

J. CAGNON AND J. NEUN. High vacuum dewatering on fourdrinier and formers. In CPPA 82nd Annual Meeting, 1996.

W. B. CAMPBELL. The physics of water removal. Pulp and Paper Magazine of Canada, 48(3):103{109, 1947.

G. CARLSSON, T. LINS-

TRÖOM, and C. Sjöremark. Expression of water from cellulosic fibers under compressive load. In Fibre-Water Interactions in Papermaking, volume 1, pages 389{409, Oxford, 1977. British Paper and Board Industry Federation.

J. M. Csordas and C. Schiel. An empirical drainage model. In CPPA Annual Meeting, Montreal, Canada, 1977.

H. S. DOBROWSKI AND L. E. BROWDELL. Residual equilibrium saturation of porous media. Ind Eng Chem, 46(6):1207, 1954.

J. D. EAMES AND N. R. MOORE. Flat box operation { improved performance. America Paper Industry, pages 11{15, 1976.

T. C. ELIAS. Investigation response of ideal unbonded fiber structure. Tappi Journal, 50(1):125{132, 1967.

F. GARDINER. How air through dewaterers porous webs. Pulp and Paper Canada, 79(3):82{86, 1978.25

J.-E. GUSTAFSSON AND V. KAUL. A general model of deformation and flow in wet fiber webs under compression. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 16(2):149{155, 2001.

J.-E. GUSTAFSSON, V. KAUL, AND V. LOBOSCO. Densification and dewatering in high temperature wet pressing. In The Science of Papermaking, volume 1, pages 149{155. FRC, 2001.

C HOSTEN AND K. V. S. SASSTRY. Empirical correlations for the prediction of cake dewatering characteristics. Minerals Engineering, 2(1):111{119, 1989.

W. L. INGMANSON. An investigation of the mechanism of water removal from pulp slurries. Tappi Journal, 35(10):439{448, 1952.

G. JONES. Dynamics simulation of dewatering in high vacuum at boxes. In Tappi Eng Conf, Anaheim, USA, 1999.

R. L. JONES. The effect of the structure properties on the compression response of fiber beds. *Tappi Journal*, 46(1):20{28, 1963.

K. A.-S. JÖNSSON AND B. T. L. JÖNSSON. Fluid flow in compressible porous media: I: Steady-state conditions. *AIChE Journal*, 38(9):1340{1348, 1992.

S. K. KARILLA AND K. RÖAISÖANEN. The moving belt drainage tester (mbtl). In *The Papermakers Conference*, Nashville, 1992.

M. KATAJA, K. HILTUNEN, AND J. TIMONEN. Flow of water and air in a compressible porous medium. a model of wet pressing. *Journal of Applied Physics*, 25: 1053{1063, 1992.

M. KATAJA, J. KIRMANEN, AND J. TIMONEN. Hydrostatic and structural pressure in compressed paper webs and press felts. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 10(3):162{166, 1995.

W. KAWKA. Consolidation of a fibrous web by means of through air | theoretical and experimental analysis of paper dewatering with through air blowing. *Tappi Journal*, 84(2), 2001.

L. LINDBERG. Pulsed drainage of paper stock. *Svensk pappers-tidning*, 73(15): 451{454, 1970.

A. LINDBLOM AND B. BLOMQVIST. Dewatering without pressing | using micropores in membranes. In *27th EUCEPA Conference*, Grenoble, France, 2001.

V. LOBOSCO AND V. KAUL. The stress-strain relationship of the fiber network in wet pressing. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 20(1):24{29, 2005.

D. MCDONALD. Web rewetting by forming fabrics. In *Tappi Engineering Conference*, Anaheim, USA, 1999.

C. MITCHELL AND R. JOHNSON. Pulsation suction during vacuum dewatering and its effects on the rate and extend of water removal. In *55th APPITA Annual Con-*

ference, Hobart, Australia, 2000.

C. MITCHELL AND R. JOHNSON. Modelling water removal from water fibre mats. In *55th Appita Annual Conference*, Hobart, Australia, 2001. 26

A. MOOSAVIFAR. Optimisation of membrane dewatering. Master's thesis, Chalmers Technical University, Gothenburg, 2003.

J. NEUN. High-vacuum dewatering of brown paper grades. In *Papermakers Conference*, 1995.

J. NEUN. High-vacuum dewatering of newsprint. *Tappi Journal*, 1996.

J. NEUN AND S. FIELDING. High-vacuum dewatering optimization. *Tappi Journal*, 1993.

J. NEUN AND S. FIELDING. High-vacuum dewatering optimization. In *Papermakers Conference*, 1994.

L. NORDMAN. Laboratory investigation of water removal by a dynamic suction box. *Tappi Journal*, 37(11):553{560, 1954.

B. Norman. On the mechanisms of dewatering in the twin-wire and press session. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, XX:39{46, 1987.

K. RÖAISÖANEN. High-vacuum dewatering on a paper machine wire section. *Papperi Ja Puu* {Paper and Timber, 78(3), 1996.

K. RÖAISÖANEN. Papermaking part 1, Stock Preparation and Wet End., volume 8 of *Papermaking and Science Technology*, chapter Vacuum Systems, pages 416{430. *Fapet Oy*, Jyväskylä, 2000.

K. RÖAISÖANEN AND H. PAULAPURO. Effect of vacuum level and suction time on vacuum assisted drainage of a paper machine wire section. In *48th Appita*, Melbourne, Australia, 1994.

K. RÖAISÖANEN AND H. PAULAPURO. The effects of retention aids, drainage conditions and pre-treatment of slurry on high-

vacuum dewatering: A laboratory study. *Tappi Journal*, 78(4):140{147, 1995.

J. SHANDS AND C. HARDWICK. Dewatering on a high vacuum at box. In *86th Annual Meeting*, Montreal, Canada, 2000.

J. S. SWEET. A basic study of water removal at the press. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 62(7):T367{T371, 1961.

R. TARNOPOLSKAYA, T. R. ADN BURWOOD. Modelling of water removal by vacuum suction. In *APPITA*, Brisbane, Australia, 1998.

C. Y. TRASENTE. The effect of top cover application on vacuum dewatering. Master's thesis, Syracuse, State University of New York, 1991.

J. VAN BRAKEL AND P. H. VAN ROOIJEN. Prediction of the air consumption when dewatering a filter cake obtained by press filtration. *Powder Technology*, 40: 235{246, 1984.

H. VOMHO AND A. SCHMIDT. The steady-state compressibility of saturated fibers at low pressures. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 12(4):267{269, 1997. 27

R. J. WAKEMAN. Vacuum dewatering and residual saturation of incompressible filter cakes. *Inter J Miner Process*, 3:193{206, 1976.

R. J. WAKEMAN. Low pressures dewatering kinetics of incompressible filter cakes. *Inter J Miner Process*, 3:379{395, 1979a.

R. J. WAKEMAN. The performance of filtration post-treatment process 1. the prediction and calculation of cake dewatering. *Fitrat Separ*, 16:655{660, 1979b.

R. J. WAKEMAN AND E. S. TARLETON. Modelling simulation and process design of the filter cycle. *Mines & Carriers: Les Techniques*, pages 5{13, Mar 1991.

H. D. WILDER. The compression creep properties of wet pulp mats. *Tappi Journal*, 43(8):715{720, 1960.