

Análise energética em refinação de baixa consistência de madeira de coníferas

Energy analysis in low consistency refining of softwood

Autores/Authors*: Tom Lundin^{1A}
 Fernanda Wurlitzer²
 Song Won Park²
 Pedro Fardim¹

Palavras-chave: Fibra de madeira de coníferas, energia, potência de funcionamento sem carga, refinação de celulose, refinador de laboratório

RESUMO

Refinação de baixa consistência (LCR) envolve uma série de variáveis termodinâmicas que provêm de intra- e interações da água com fibras celulósicas dentro do processo. Os tópicos presentes energia e eficiência são usados com frequência, mas ainda constituem conceitos imprecisos em LCR. Este trabalho investigou a energia consumida no processo de refinação de celulose. Foram realizados experimentos laboratoriais em combinação com modelação matemática mediante a aplicação de um balanço energético elementar. Uma suspensão de celulose kraft de madeira de coníferas foi submetida a tratamento sem carga num refinador ProLab™, com três consistências diferentes. A energia mecânica de entrada, que determinava o desenvolvimento das propriedades da celulose e as alterações do sistema térmico, foi monitorada por um único sensor de temperatura, além do fluxo de celulose e da pressão do sistema, no refinador de celulose de laboratório. A energia de entrada foi analisada, dividida e modelada, e pôde equilibrar o sistema. O modelo pode ser usado para prever o desempenho do sistema com outros valores paramétricos. A taxa de transferência

Keywords: Energy, idling power, laboratory refiner, pulp refining, softwood fibre

ABSTRACT

Low consistency refining (LCR) involves a number of thermodynamic variables that arise from water and pulp fibre intra- and interactions within the process. The present topics energy and efficiency are frequently used but still constitute imprecise concept in LCR. This work investigated the energy consumed in the pulp refining process. Laboratory experiments in combination with mathematical modelling were performed applying an elementary energy balance. A softwood kraft pulp suspension was subject to no-load treatment in a ProLab™ refiner at three different consistencies. The input mechanical energy governing the pulp property development and the thermal system changes was monitored by a single temperature sensor, in addition to pulp flow and system pressure, in the laboratory pulp refiner. The input energy was analysed, split and modelled and could balance the system. The model can be used to predict the system performance with other parameter values. The energy transfer rate, and

*Referências dos Autores / Authors' references:

- 1A. Laboratório de Tecnologia de Fibras e Celulose, Universidade Åbo Akademi, Porthansgatan 3, FI-20500, Turku/Åbo, Finlândia. Atualmente junto ao Centro de Excelência FunMat, Departamento de Química Física, Universidade Åbo Akademi. E-mail: tlundin@abo.fi
Laboratory of Fibre and Cellulose Technology, Åbo Akademi University, Porthansgatan 3, FI-20500, Turku/Åbo, Finland. Currently with Center of excellence FunMat, Department of Physical Chemistry, Åbo Akademi University. E-mail: tlundin@abo.fi
1. Laboratório de Tecnologia de Fibras e Celulose, Universidade Åbo Akademi, Porthansgatan 3, FI-20500, Turku/Åbo, Finlândia. E-mail: pfardim@abo.fi
Laboratory of Fibre and Cellulose Technology, Åbo Akademi University, Porthansgatan 3, FI-20500, Turku/Åbo, Finland. E-mail: pfardim@abo.fi
2. Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, 05508-900, Av. Luciano Gualberto, 380, São Paulo, Brasil.
 E-mails: fernanda.wurlitzer@poli.usp.br - sonwpark@usp.br
Chemical Engineering Department, University of Sao Paulo, 05508-900, Av Luciano Gualberto, 380, Sao Paulo, Brazil.
 E-mails: fernanda.wurlitzer@poli.usp.br - sonwpark@usp.br

Autor correspondente/Corresponding author: Tom Lundin

de energia – e implicitamente a consistência da celulose –, determinou a forma de tratamento das fibras e, por conseguinte, a amplitude e o tipo de alterações na estrutura das fibras, isto é, o desenvolvimento das propriedades da celulose, úmida e seca. A taxa de transferência foi decisiva para a eficiência energética do processo LCR. Os resultados indicaram que a energia sem carga, consumida em água e fibras, foi completamente convertida em calor sensível nas condições investigadas.

HISTÓRICO

Na refinação de celulose, as fibras são mecanicamente condicionadas para o aprimoramento de propriedades-chave do papel seco. O tratamento afeta propriedades estruturais, morfológicas e interativas das fibras e aumenta o potencial de ligação entre fibras, devido a alterações nas fibras e suas paredes celulares, o que aumenta a conformabilidade das fibras, resultando numa consolidação da estrutura do papel. A refinação da celulose geralmente eleva a resistência física e reduz as propriedades ópticas da folha.

A energia da refinação de celulose representa um tópico bem-debatido, cuja origem remonta a um passado remoto na história, constituindo o objetivo deste estudo. A modificação das fibras pode ser responsável por uma parcela significativa dos custos de energia numa fábrica de papel (Siewert e Selder 1980), podendo constituir 10%-40% do total da energia elétrica consumida por uma fábrica de papel (Levlin 1988). Várias cifras de eficiência, que variam de 0,1% (van den Akker 1958) a acima de 70%, como no presente artigo, têm sido apresentadas para o processo LCR, algumas das quais se referiam a tipos de papel com pasta mecânica (Lama *et al.* 2007). Observações iniciais consideravam a potência consumida em refinação como componentes de atrito, circulação e agitação (Cross e Bevan 1907). O conceito de potência sem carga se desenvolveu ao longo dos anos (Espenmiller 1969; Glasl 1976, Nordman *et al.* 1980), sendo carga nula uma questão comum em fábricas nos dias de hoje. Contudo, a carga nula ou potência de funcionamento sem carga de um refinador de celulose não é um procedimento padronizado, considerando-se o seu desempenho (Baker 2003, Koskenhely 2007). Uma definição de potência sem carga reza: “energia consumida por perdas em funcionamento sem carga num refinador com fluxo de massa e placas em posição retraída” (Anon. 2000). Considerando-se que a carga nula varia em função da consistência da polpa (Lundin 2008) e da fenda de refinação (Rihs 1995, Lundin 2008), ocorrem flutuações dependentes do procedimento. Uma imprecisão nos valores da carga nula pode resultar em energias de refinação inconsequentes ou, no pior dos casos, até mesmo errôneas (Baker 2003). Tais questões podem ser uma fonte potencial para a comparabilidade deficiente de resultados de refinação, ocasionalmente testemunhada (Koskenhely 2007), o que também pode estar relacionado com efeitos do tamanho do

implicitly the pulp consistency, determined the mode of fibre treatment and thus the extent and type of changes in the fibre structure, i.e. the development of pulp properties, wet and dry. The transfer rate was decisive for the LCR process energy efficiency. The results indicated that the no-load energy, spent on water and fibres, was completely converted into sensible heat at the investigated conditions.

BACKGROUND

In pulp refining the fibres are tailored mechanically for enhancement of dry paper key properties. The treatment affects structural, morphological and interactive fibre properties and enhances the fibres' bonding potential, due to changes in the fibres and their cell walls, which increases fibre conformability that result in a consolidation of the paper structure. Generally pulp refining enhances the physical strength and declines the optical sheet properties.

*The energy of pulp refining represents a well-debated topic originally started long back in history and constitutes the aim for this study. The fibre modification may be responsible for a significant share of the energy costs in a paper mill (Siewert and Selder 1980) and may constitute 10%-40% of the total electrical energy consumed by a paper mill (Levlin 1988). Various efficiency figures ranging from 0.1% (van den Akker 1958) to above 70%, as in the current paper, have been presented for the LCR process. Some have related to mechanical paper grades (Lama *et al.* 2007). Early observations considered the power consumed in beating as friction, circulation and agitation components (Cross and Bevan 1907). The concept of no-load power has developed during the years (Espenmiller 1969, Glasl 1976, Nordman *et al.* 1980) and no-load is a common issue at mills today. The no-load or idling power of a pulp refiner is however not any standardised procedure considering its performance (Baker 2003, Koskenhely 2007). One definition of no-load power reads: “power consumed by idling losses in refiner with stock flowing and plates in retracted position” (Anon. 2000). Considering that the no-load varies with pulp consistency (Lundin 2008) and refining gap (Rihs 1995, Lundin 2008), procedure-dependent fluctuations will occur. Inaccuracy in no-load values may lead to inconsequent or, in the worst case, even erroneous refining energies (Baker 2003). Such issues can be a potential source for the occasionally witnessed poor refining result comparability (Koskenhely 2007), which also*

refinador. Assim sendo, para se obter uma comparabilidade aprimorada, seria necessário pôr em prática uma abordagem mais sistemática da potência sem carga.

Embora se conheça muito acerca de fibras – o seu comportamento na refinação e após a mesma – ainda há uma falta de conhecimento em relação aos próprios mecanismos da forma pela qual a energia é consumida no processo.

O atual debate sobre energia motivou este trabalho, que investigou a energia consumida no processo de refinação de celulose. Foram realizados trabalhos laboratoriais e modelação termodinâmica, combinando teoria e experimentos mediante a aplicação de um balanço energético. O comportamento de um sistema de refinação operando com discos para madeira de coníferas convencionais, mediante a utilização de fibras de madeira de coníferas com todos os parâmetros de processo fixos, exceto a consistência da polpa, foi observado à medida que as fibras iam sendo submetidas a um tratamento de refinação ultrasuave, enquanto o dispositivo era operado em modo sem carga, com folga de 1,0 mm entre barras. Os resultados deste estudo acadêmico encorajam-nos a relatar as nossas observações.

Análise energética

A energia pode passar de uma forma mais ordenada (elétrica, mecânica) para uma menos ordenada (*p. ex.*, calor), mas nunca pode ser destruída (Çengel e Boles 2006). Um balanço energético geral de um sistema pode ser formulado como:

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{saída}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad \text{Equação 1}$$

em que a diferença entre a energia que entra no sistema e a que dele sai é igual à alteração na energia total do sistema. Energia pode ser transferida na forma de calor, trabalho e massa. A respectiva transferência líquida dessas quantidades é a diferença entre os montantes transferidos para dentro e para fora.

A eficiência² dos motores elétricos (energia elétrica de saída/entrada do eixo, indicada como $\cos \phi$) se deve a: resistência elétrica primária e secundária (perdas do cobre), ferro (magnético), perdas por dispersão e perdas mecânicas nos mancais (Anon. 2006). Perdas nos mancais resultam do atrito de rolamento, e perdas hidrodinâmicas se devem a forças de cisalhamento da interação entre a turbomáquina e o fluido, e dependem da taxa de cisalhamento, da geometria e da reologia do fluido. Essas perdas têm sido comumente denominadas carga nula ou potência de funcionamento sem carga. A energia de modificação das fibras é consumida por forças mecânicas de refinação, que proporcionam as deformações das fibras que são responsáveis tanto pelas modificações desejadas como pelas indesejadas. Esta última é convencionalmente denominada

may relate to refiner size effects. Thus a more systematic approach to the no-load power would be required for enhanced comparability.

Although much is known about fibres – their behaviour in and after refining – there is yet a lack of knowledge concerning the very mechanisms on how the energy is consumed in the process.

The current energy debate motivated this work, which investigated the energy consumed in the pulp refining process. Laboratory work and thermodynamic modelling was performed combining theory and experiments by applying an energy balance. The behaviour of a refining system running conventional softwood fillings using softwood fibres with all process parameters fixed except pulp consistency was observed as the fibres were subjected to a ultra-mild type refining treatment while running the device in no load mode at bar clearance 1.0 mm. The results from this academic study encourage us to report our observations.

Energy analysis

Energy can change from a higher (electrical, mechanical) to a less ordered form (e.g. heat) but never be destroyed (Çengel and Boles 2006). A general energy balance of a system can be formulated as:

$$E_{\text{in}} - E_{\text{out}} = \Delta E_{\text{system}} \quad \text{Equation 1}$$

where the difference in the energy entering and leaving the system equals the change in the total energy of the system. Energy can be transferred in the form of heat, work and mass. The respective net transfer of these quantities is the difference in the amounts transferred in and out.

The efficiency² of electric motors (shaft output/input electric power, denoted $\cos \phi$) is due to: primary and secondary electrical resistance (copper losses), iron (magnetic), stray and mechanical bearing losses (Anon. 2006). Bearing losses arise due to the rolling friction and hydrodynamic losses are due to shear forces of the turbo machine-fluid interaction and depend on shear rate, geometry and fluid rheology. These losses have commonly been termed no-load or idling power. The fibre modification energy is consumed by mechanical refining forces providing the fibre deformations responsible for both desired and undesired fibre modifications. The latter is conventionally termed specific energy

2. A eficiência nominal, de acordo com, *p. ex.*, as normas da Associação Nacional de Fabricantes Elétricos (NEMA), depende do tamanho do motor, podendo variar de 0,79 a 0,92 / *The nominal efficiency, according to e.g. National Electrical Manufacturers Association (NEMA) standards, depends on motor size and can range 0.79 - 0.92*

consumo específico de energia (*SEC*, kWh/t). Essa contribuição é calculada mediante a utilização da energia despendida, somada para o tempo de refinação, *t*, quer adotando-se a energia líquida, quer a total, daí resultando (Brecht 1967):

$$SEC = \frac{P_{liquida}}{\dot{m}_F} = \frac{P_{liquida}}{c_F \dot{V}} = \frac{P_{liquida} t}{c_F V} \quad \text{Equação 2}$$

O uso da energia total fornece o consumo total de energia:

$$TEC = \frac{P_{total}}{\dot{m}_F} = \frac{P_{total}}{c_F \dot{V}} = \frac{P_{total} t}{c_F V} \quad \text{Equação 3}$$

Uma suspensão fibrosa sob cisalhamento consome energia principalmente durante as deformações físicas (morfológicas) das fibras, que podem ser do tipo viscoelástico (reversíveis e dependentes do tempo) ou plástico (irreversíveis). Trabalho de deformação é armazenado num material ou num corpo quando este é elasticamente deformado, podendo ser liberado na medida em que uma trinca se desenvolve através do corpo, quando novas superfícies são criadas (Matthews e Rawlings 1999). Deformações totalmente elásticas são reversíveis, isto é, o trabalho de deformação aplicado abaixo do nível de escoamento do material pode ser recuperado. Em materiais viscoelásticos, a energia é tanto recuperada quanto liberada como calor, e a sua alocação depende das características de deformação do material, durante a recuperação da forma, como, p. ex., em pneus de carros, a energia de deformação é parcialmente dissipada durante a tensão viscoelástica: a borracha esquenta ao se deformar. No caso de deformação plástica, que ocorre acima do ponto de escoamento dos materiais, o trabalho de deformação é consumido em alterações permanentes e irreversíveis (Çengel e Boles 2006). Estas são representadas por mudanças estruturais impostas no material devido ao reordenamento físico das moléculas e/ou suas ligações, ou um rompimento completo das ligações envolvidas. Uma decomposição esquemática da energia elétrica de entrada no processo LCR em contribuidores implícitos é apresentada na Figura 1.

consumption (*SEC*, kWh/t). This contribution is calculated using the spent power summed for refining time, *t*, either using net or total power from which follows (Brecht 1967):

$$SEC = \frac{P_{net}}{\dot{m}_F} = \frac{P_{net}}{c_F \dot{V}} = \frac{P_{net} t}{c_F V} \quad \text{Equation 2}$$

Usage of the total power delivers the total energy consumption:

$$TEC = \frac{P_{tot}}{\dot{m}_F} = \frac{P_{tot}}{c_F \dot{V}} = \frac{P_{tot} t}{c_F V} \quad \text{Equation 3}$$

A fibre suspension at shear primarily consumes energy during physical (morphological) fibre deformations, which can be of viscoelastic (reversible and time-dependent) or plastic (irreversible) type. Strain energy is stored in a material or a body when it is elastically deformed and may be released as a crack grows through the body when new surfaces are created (Matthews and Rawlings 1999). Fully elastic deformations are reversible, i.e. the applied strain energy below the material's level of yielding can be recovered. In viscoelastic materials the energy is both recovered and released as heat, their allocation depends on the material's deformation characteristics, during the shape recovery, e.g. in car tires, the deformation energy partly is dissipated during viscoelastic strain: rubber gets warm when deformed. In the case of plastic deformation, occurring above the materials yield point, the strain energy is consumed in permanent and irreversible changes (Çengel and Boles 2006). These are represented by structural changes imposed in the material due to physical rearrangement of molecules and/or their bonds, or a complete breakage of the involved bonds. A schematic break down of the electric input energy in the LCR process into implicit contributors is presented in Figure 1.

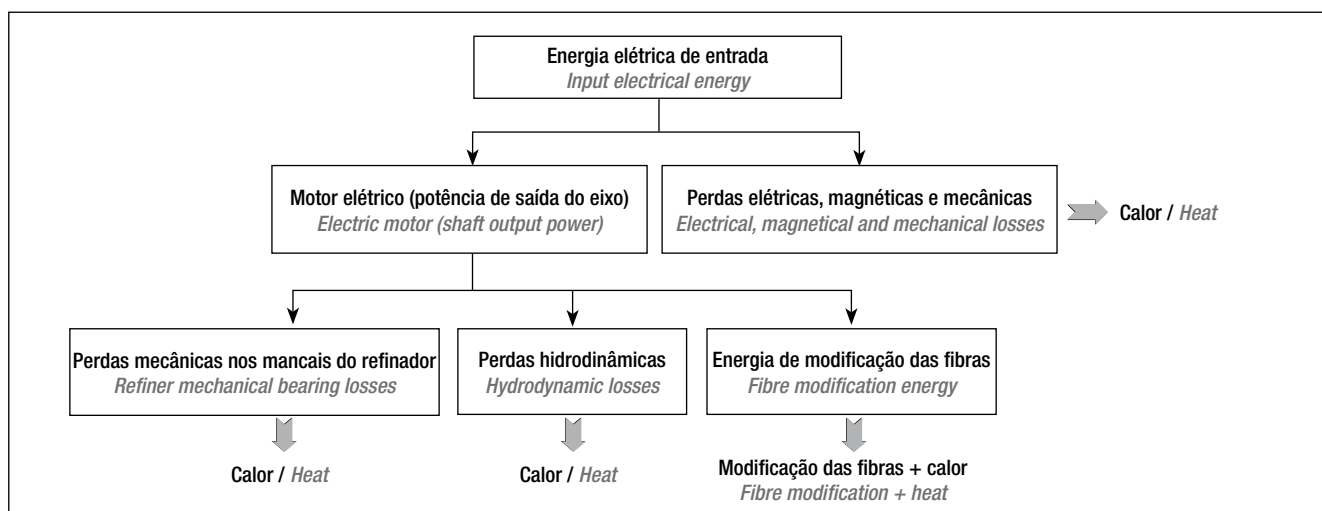


Figura 1. Decomposição da energia do processo LCR / Figure 1. Energy break down of the LCR process

Assim, uma parte preponderante da energia de refinação mecânica introduzida é convertida em calor sensível em algumas situações, o que é registrado como elevação de temperatura da suspensão. O processo de refinação da polpa representa uma decomposição estrutural mais ou menos controlada das fibras, por meio de ruptura das ligações químicas básicas, a expensas de energia elétrica altamente ordenada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi usada nos ensaios uma polpa kraft seca, obtida de madeira de coníferas finlandesa e branqueada por processo livre de cloro elementar. A polpa de reforço foi produzida por uma fábrica de celulose do sudeste da Finlândia e apresentava um comprimento médio ponderado das fibras de 2,44 mm e uma *coarseness* média das fibras de 0,183 mg/m. A polpa foi refinada num refinador Prolab™, operando com elementos cônicos do tipo Long Medium (LM), com um comprimento da aresta de corte (CEL) de 30,8 m/rev. A máquina foi operada a uma rotação do refinador de 2250 rpm (velocidades correspondentes das barras do rotor: 7,5-15,3 m/s, dependendo do raio do rotor), uma folga de 1,0 mm entre barras e 100 L/min de vazão da polpa, tendo sido todos estes valores mantidos constantes durante o experimento. Os ensaios representam uma variante de operações processadas com energia sem carga, uma vez que eles foram realizados com uma folga entre barras muito superior à usada em refinação normal (0,2-0,05 mm). Foram usadas três consistências da polpa de madeira de coníferas: 2,4% e 6% em peso. Para fins de referência, o refinador também foi operado somente com água (sem fibras: 0%), tendo sido aplicadas condições idênticas. O fluxograma de processo da estação de refinação está reproduzido na Figura 2. A quantidade necessária de fibras celulósicas, visando a uma consistência exata, foi alimentada no desagregador com 52 L de água e desagregada por 15 min. Em todos os ensaios se usou água de torneira com uma densidade presumida de 1000 kg/m³. Para os cálculos termodinâmicos, a massa de aço na tubulação e peças da maquinaria associadas, submetidas a aquecimento, foi estimada em 130 kg. Todas as bateladas de celulose foram preparadas na véspera e deixadas no refinador durante a noite, para estabilizar a temperatura em relação ao ambiente, antes de serem processados os ensaios. Todos os ensaios foram repetidos da mesma maneira sistemática, visando a uma comparabilidade aprimorada. Durante a refinação da polpa foram retiradas três amostras de cada ensaio: a primeira foi coletada do misturador antes da refinação; a segunda, quando a temperatura da suspensão de polpa atingiu 40°C e a última, quando a temperatura havia atingido 60°C. A localização dos sensores de temperatura, pressão e vazão da suspensão, bem como o torquímetro usado para calcular a energia de refinação spendida, estão indicados na Figura 2.

Thus a majority of the introduced mechanical refining energy is converted into sensible heat at some instance, which is registered as temperature rise of the suspension. The pulp refining process represents a more or less controlled structural fibre decomposition, by means of basic chemical bond-breaking, at the expense of highly ordered electric energy.

MATERIALS AND METHODS

A Finnish softwood ECF-bleached dry lap kraft pulp was used in the trials. The reinforcement pulp was produced by a pulp mill in south-eastern Finland and had a length-weighted fibre length of 2.44 mm and an average fibre coarseness of 0.183 mg/m. The pulp was refined in a Prolab™ refiner, running conical Long Medium (LM) type fillings with a cutting edge length (CEL) of 30.8 m/rev. The machine was run at a refiner rotational speed of 2250 rpm (corresponding rotor bar velocities: 7.5-15.3 m/s, depending on rotor radius), 1.0 mm bar clearance and 100 L/min pulp flow rate that all were kept constant during the experiment. The trials represent a variant of idling power runs since they were performed at a bar clearance much greater than in normal refining (0.2-0.05 mm). Three softwood pulp consistencies were used: 2.4 and 6 weight-%. For reference, the refiner was also run with water only (no fibres: 0%), applying identical conditions. The process flow diagram of the refining station is depicted in Figure 2. The required amount of pulp fibres, for exact consistency, was fed into the pulper with 52 L water and slushed for 15 min. Tap water was used in all trials and its density was assumed to be 1000 kg/m³. For thermodynamic calculations the mass of steel in the related piping and machinery parts subjected to heating was estimated to be 130 kg. All pulp batches were prepared the day before and left in the refiner to settle temperature with the surrounding overnight before the running the trials. All trials were repeated in the same systematic way for enhanced comparability. During pulp refining three samples were taken in each trial: the first one was collected from the mixer prior to refining; the second when the pulp suspension temperature reached 40°C, and the final when the temperature had reached 60°C. The locations of sensors for suspension temperature, pressure and flow, and the torque meter, used for calculating the spent refining energy, are indicated in Figure 2.

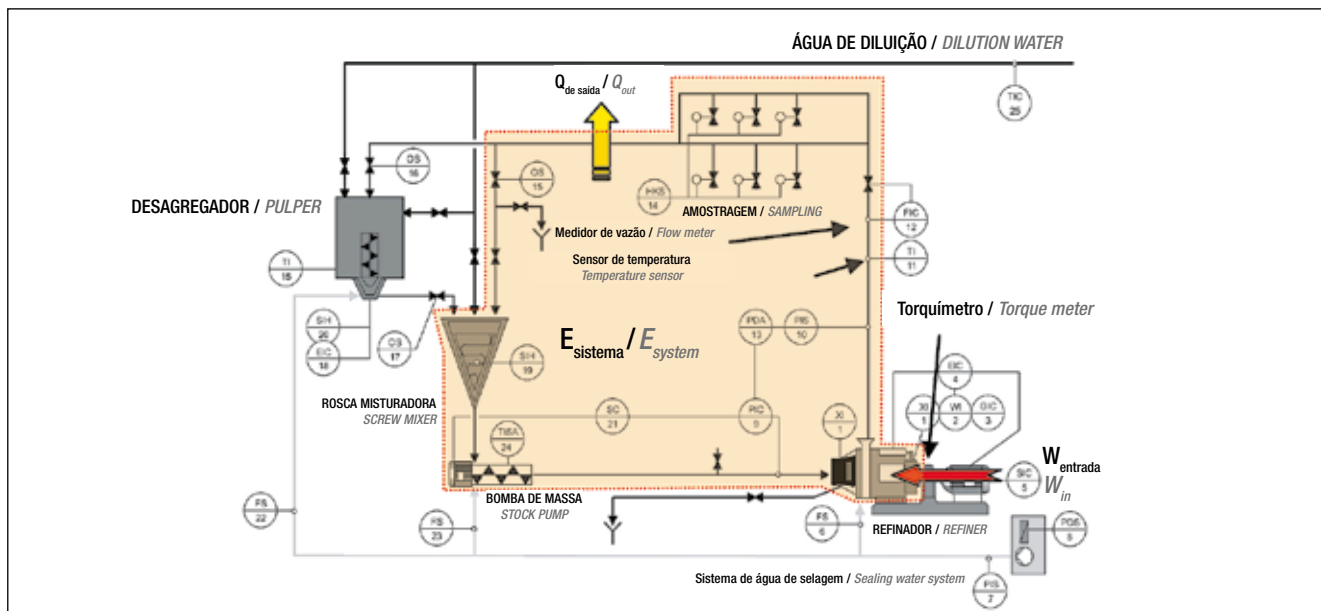


Figura 2. O sistema do refinador Prolab™, com os sensores indicados / *Figure 2. The Prolab™ refiner system with sensors indicated*

As amostras de polpa foram pesadas e testadas em relação a propriedades tradicionais da polpa de acordo com normas ISO, Schopper-Riegler e WRV (índice de retenção de água). Um analisador FiberLab® foi usado para uma análise dimensional das fibras, e folhas feitas à mão foram preparadas e testadas quanto à densidade, resistência à tração, resistência ao rasgo, permeabilidade ao ar Gurley e propriedades ópticas de acordo com normas ISO.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em duas partes: a primeira lida com o desenvolvimento de propriedades da polpa durante os ensaios, enquanto a segunda parte aplica um modelo de balanço energético aos dados obtidos do sistema de refinação estudado.

Propriedades da polpa

Antes de examinarmos as propriedades da polpa, as condições de processo referentes a cifras de potência e energia requerem alguma atenção. Visando à precisão, os experimentos foram realizados mediante a utilização de uma potência sem carga determinada somente com circulação de água no refinador de laboratório – vide Figura 3. Ficou mais uma vez confirmado que o nível da potência sem carga era uma função da consistência da polpa para esse refinador. Anteriormente se havia observado que os efeitos da consistência se reduzem gradualmente, até cessarem (Lundin 2008). O nível constante do fluxo de alimentação de polpa (estabelecido em 100 L/min) afetou a taxa de transferência de energia, que, evidentemente, caiu ao ter sido aumentada a consistência da polpa. Os ensaios de refinação foram realizados, portanto, a taxas não-isométricas de transferência de energia.

The pulp samples were weighted and tested for traditional pulp properties according to ISO-standards: Schopper-Riegler and WRV. A Fiber-Lab® Analyzer was used for fibre dimensional analysis and handsheets were prepared and tested for density, tensile strength, tear strength, Gurley air permeability and optical properties according to ISO standards.

RESULTS AND DISCUSSION

The results are presented in two parts: the first deals with development of pulp properties during the trials, and the second part applies an energy balance model to the data from the studied refining system.

Pulp properties

Prior to examining the pulp properties, the process conditions regarding power and energy figures need some attention. For exactness, the experiments were performed by utilising a no-load power determined with water only circulating in the laboratory refiner, Figure 3. It was once again confirmed that the no-load power level was a function of pulp consistency for this refiner. It has previously been observed that the consistency effects gradually are subsided (Lundin 2008). The constant level of the pulp feed flow (chosen to be 100 L/min) affected the energy transfer rate, which evidently fell as the pulp consistency was increased. The refining trials were thus carried out at non isometric energy transfer rates.

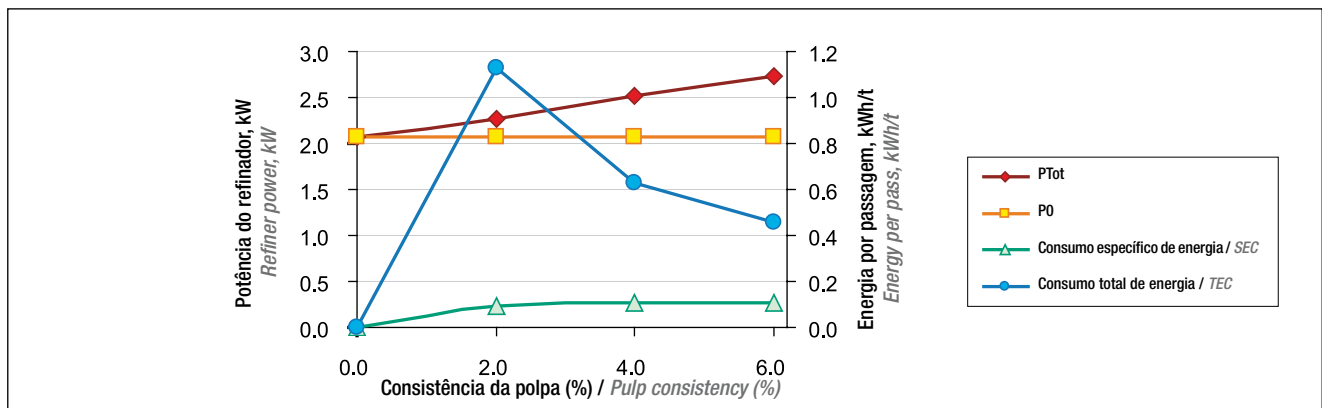


Figura 3. Componentes da potência do refinador (pontos de dados verdes, amarelos e vermelhos) e admissão de energia por passagem pelo refinador (pontos de dados azuis) em função da consistência da polpa / **Figure 3.** Refiner power components (green, yellow and red data points) and energy input per refiner pass (blue data points) as function of the pulp consistency

A resistência à tração das folhas da polpa feitas à mão foi prontamente melhorada durante os tratamentos sem carga, ainda que a pequenas expensas da drenagem de polpa – vide Figura 4. Isso ocorreu apesar de não ter sido proporcionada nenhuma ação de refinação convencional – ou apenas bem marginal – do tipo barra-fibras-barra. A capacidade de retenção de água das fibras celulósicas, determinada na forma de WRV (índice de retenção de água), beneficiou-se do tratamento de refinação nas mesmas proporções, indicando a criação de fibrilação externa e/ou interna. O tratamento de refinação aplicado foi principalmente um intenso tratamento tipo cisalhamento, em que as barras do refinador aceleravam momentaneamente as fibras que, ao entrarem no refinador, encontravam-se num estado mais ou menos floculado.

O aumento da resistência à tração (e do alongamento de tração) tem sido explicado pela ativação intensificada das fibras na folha seca, através da teoria sobre ativação de segmentos de fibras (Giertz 1964). Mais recentemente, Hiltunen (2003) raciocinou que a refinação gera inchamento das fibras, que promove ativação das fibras como fornecedoras de força na

The pulp handsheet tensile strength was readily improved during the no-load treatments, however at small expenses of pulp drainage, Figure 4. This despite that none, or only very marginal, conventional bar-fibres-bar type refining action was provided. The pulp fibre water-retaining capacity, determined as the WRV-value, gained in same proportions by the refiner treatment indicating creation of external and/or internal fibrillation. The applied refining treatment was mainly an intense shear-type treatment where the refiner bars momentarily accelerated the fibres that, upon refiner entrance, were in a more or less flocculated state.

The increased tensile strength (and tensile stretch) has been explained by enhanced fibre activation in the dry sheet by the theory on activation of fibre segments (Giertz 1964). More recently Hiltunen (2003) reasoned that beating, or refining, generates fibre swelling that promotes activation of fibres as

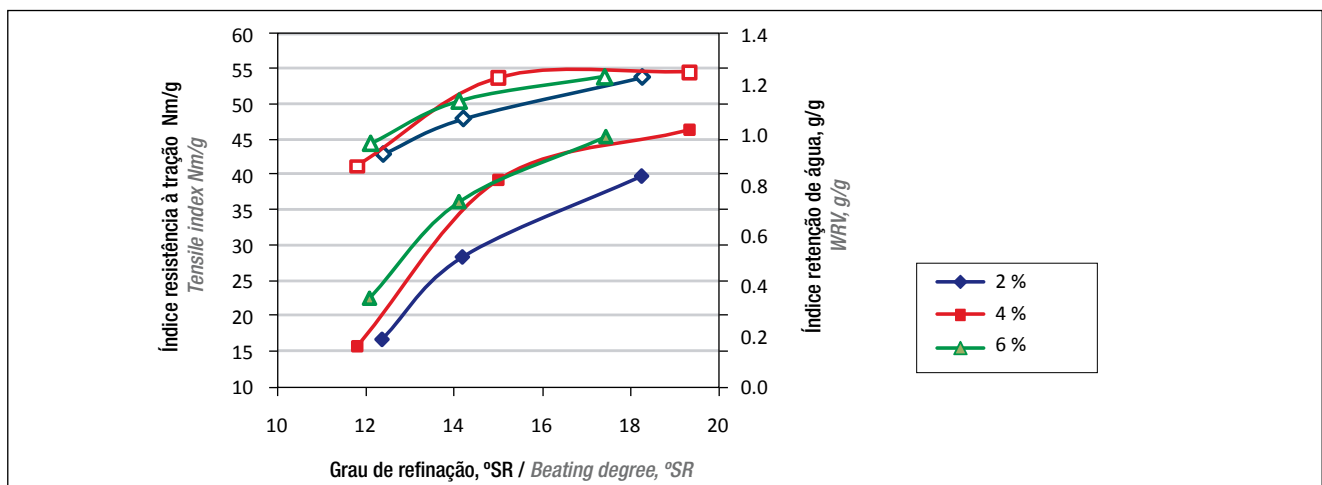


Figura 4. Desenvolvimento da resistência à tração das folhas de polpa feitas à mão (pontos de dados cheios) e do índice de retenção de água (WRV) (pontos de dados vazios), em relação ao número SR durante os tratamentos sem carga / **Figure 4.** Development of the pulp handsheet tensile strength (filled data points) and water retention value (WRV) (hollow data points) versus SR-number during the no-load treatments

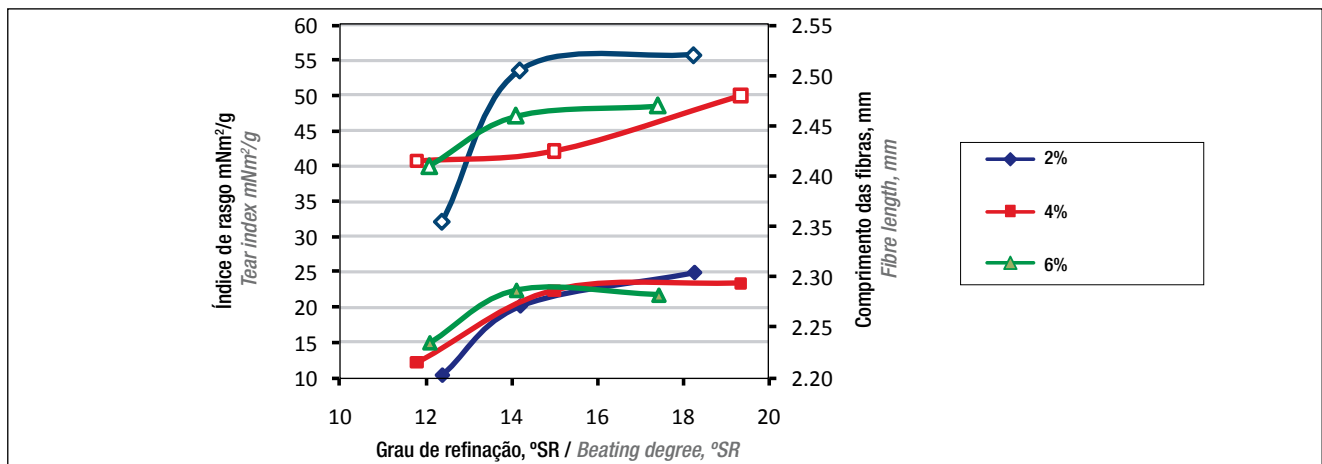


Figura 5. Desenvolvimento do encurvamento das fibras celulósicas (pontos de dados cheios) e espessura média da parede celular Kajaani (pontos de dados vazios) durante os tratamentos sem carga / **Figure 5.** Development of the pulp fibre curl (filled data points) and average Kajaani cell wall thickness (hollow data points) during the no-load treatments

rede do papel seco. Tal ativação das fibras ocorreria, portanto, através de tensões de endireitamento e secagem das fibras (em caso de papéis secados sob tensão), que melhoram a ativação dos segmentos de fibras e aumentam a rigidez axial das fibras. Uma consistência mais alta da polpa nos ensaios de refinação apresentados proporcionou um tratamento mais eficaz das fibras devido à maior quantidade de interação entre as fibras. O grau, ou intensidade, do tratamento mecânico das fibras fornecido refletiu-se no grau de aprimoramento das propriedades físicas das folhas feitas à mão.

Geralmente as fibras ficavam mais longas (Figura 5) e perdiam o seu encurvamento original, exceto quando a 6% de consistência, caso em que se observou o aumento do encurvamento (Figura 6). A máxima taxa de cisalhamento no afastamento de refinação estava na faixa de 7500 – 15000 s⁻¹, dependendo do raio do rotor e, assim sendo, as barras do rotor proporcionavam uma ação de aceleração e de dispersão das fibras. É óbvio que as fibras retidas pelas barras móveis eram submetidas principalmente a forças longitudinais, o que também é corroborado pelo aumento observado no comprimento das fibras. Assim sendo, a consistência da polpa afetou significativamente o modo do tratamento sem carga.

Está bem fundamentado o fato de que uma consistência mais alta da polpa no processo de refinação proporciona um tratamento mais suave das fibras (Smith 1919, Casey 1960, Ebeling 1980, Hietanen 1991, Lundin 2008), que se deve ao maior número de fibras, ou massa, por volume submetido a tensão e subsequentemente menor, mas maior número de forças por fibra. As consistências de polpa usadas, de 2,4% e 6% em peso, podem ser comparadas com o comportamento de deformação de 100 000, 200 000 ou 300 000 fibras num volume⁽³⁾ de 1 mm³, o que ilustra que esse último caso, com

force suppliers in the dry paper network. Such fibre activation would thus occur via fibre straightening and drying stresses (for restraint dried papers) that improve the fibre segments' activation and increase the axial fibre stiffness. A higher pulp consistency in the presented refining trials provided a more effective fibre treatment due to greater amount of fibre-fibre interaction. The degree, or intensity, of the supplied mechanical fibre treatment was reflected in the rate of enhancement of the handsheet physical properties.

Generally the fibres became longer (Figure 5) and lost their original curl, except at 6 weight-% where the curl was seen to increase (Figure 6). The maximum shear rate in the refining gap was in the range 7500 – 15000 s⁻¹, depending on the rotor radius, and the rotor bars provided, thus, a fibre accelerating and dispersing action. It is apparent that the fibres trapped by the moving bars where subjected mainly to longitudinal forces, which also is supported by the observed increase in fibre length. The pulp consistency affected thus significantly the mode of the no-load treatment.

It is well-established that a greater pulp consistency in refining delivers a milder fibre treatment (Smith 1919, Casey 1960, Ebeling 1980, Hietanen 1991, Lundin 2008) that is due to higher number of fibres, or mass, per volume strained and subsequently smaller but greater number of forces per fibre. The used pulp consistencies, 2,4 and 6 weight-%, can be compared to the deformation behaviour of 100 000, 200 000 or 300 000 fibres in a 1 mm³ volume⁽³⁾, which illustrates that the latter case, with the greatest num-

(3) O número de fibras SW por grama foi da ordem de 5 000 000. Portanto, em 1 mL de suspensão a 2% de consistência havia aproximadamente: 2*5E6/100 = 100 000 fibras; 4*5E6/100 = 200 000 e 6*5E6/100 = 300 000 fibras por mL das suspensões a 4% e 6%, respectivamente

The number of SW fibres per gram was of order 5 000 000. Thus, in 1 mL of a 2 weight-% suspension there were approximately:

2*5E6/100 = 100 000 fibres; 4*5E6/100 = 200 000 and 6*5E6/100 = 300 000 fibres per mL of the 4 and 6 weight-% suspensions, respectively

o número mais alto de fibras por volume, comportar-se-á diferentemente em relação a forças de cisalhamento. O tipo suave de tratamento LCR das fibras, obtido com consistências mais altas da polpa, a que anteriormente se fazia referência como “umedecimento” ou “escovação” (Espenmiller 1969, Casey 1960, d’A. Clark 1978), descreve o desprendimento de fibrilas externas e fragmentos de fibras, o que é designado como “fibrilação externa”. Geralmente, uma consistência de refinação mais alta também reduz o encurtamento das fibras, mas cria fibras encurvadas ao invés disso.

É bem conhecido o fato de que a resistência ao rasgo de folhas de polpa feitas à mão (Figura 6) é altamente dependente do índice de comprimento médio das fibras, apresentando resultados – ver Figura 5 – em boa concordância com isto. Um menor número de fibras por volume resultou em fibras mais retas e mais longas, ao passo que um tratamento com consistência da polpa de 6% resultou na geração de encurvamento das fibras – ver Figura 6. Os dados medidos da espessura da parede celular conforme Kajaani implicam que ocorreu fibrilação externa em seguida ao tratamento de cisalhamento. Era evidente que a forma do tratamento proporcionava ação de cisalhamento nas fibras, promovendo uma liberação de partes externas das fibras.

Os resultados apresentados indicaram que a modalidade do tratamento das fibras aplicada na refinação da polpa, principalmente no que se refere ao comprimento e ao encurvamento das fibras, foi sensível em relação à consistência da polpa na faixa de 2%–6%, com as demais condições constantes. Foi evidente que o tratamento de refinação fornecido se alterou com a taxa de transferência de energia e a consistência da polpa: um pequeno número de fibras por volume intensificou o endireitamento das fibras devido a uma maior incidência de contatos entre barras e fibras, ao passo que cifras de consistência mais elevadas implicam mais interações entre as fibras.

ber of fibres per volume, will behave differently to shear forces. The mild type of LCR fibre treatment achieved at higher pulp consistencies was earlier referred to as “wetting or” “brushing” (Espenmiller 1969, Casey 1960, d’A. Clark 1978) and depicts the loosening of external fibrils and fibre fragments, which is denoted “external fibrillation”. Generally, a higher refining consistency also reduces fibre shortening, but creates curly fibres instead.

It is well-known that the pulp handsheet tear strength (Figure 6) is strongly dependent on the average fibre length index, and the results were well in concordance, Figure 5. A lower number of fibres per volume resulted in straighter and longer fibres whereas a treatment at 6% pulp consistency resulted in creation of fibre curl, Figure 6. The measured data on the Kajaani cell wall thickness imply that an external fibrillation occurred upon the shear treatment. It was apparent that the mode of the treatment provided shearing action on fibres promoting a release of external fibre parts.

The presented results indicated that the mode of the fibre treatment applied in pulp refining, especially regarding the fibre length and curl, was sensitive towards pulp consistency in the range 2%–6% provided otherwise constant conditions. It was apparent that the supplied refining treatment changed with the energy transfer rate, and the pulp consistency: a small number of fibres per volume enhanced fibre straightening due to greater share of bar-fibre contacts, whereas higher consistency figures imply more fibre-fibre interactions.

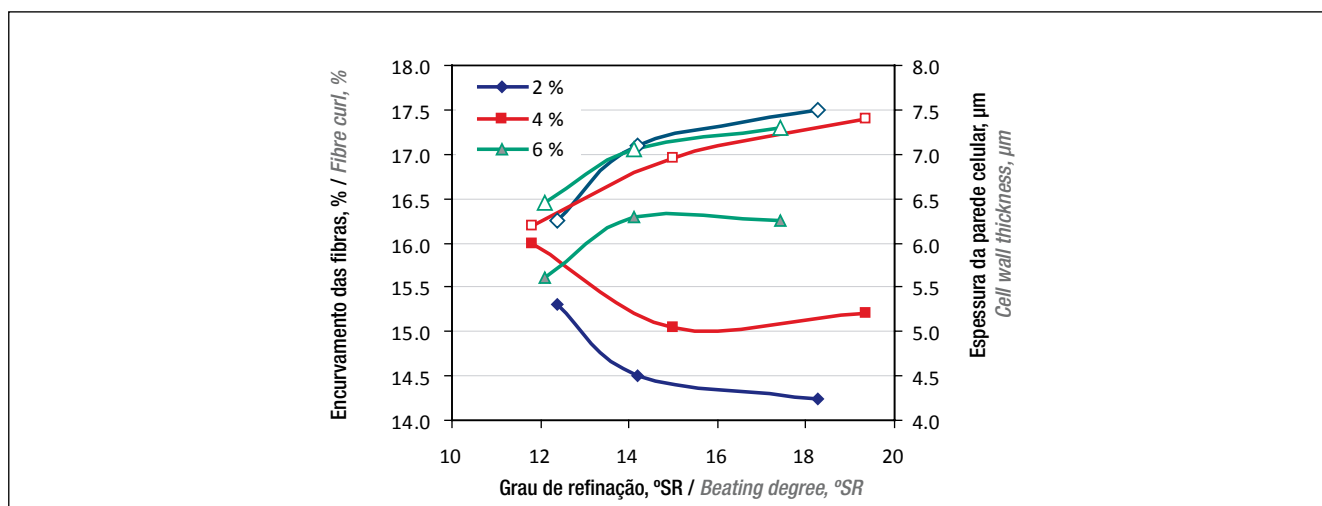


Figura 6. Desenvolvimento da resistência ao rasgo de folhas de polpa feitas à mão (pontos de dados cheios) e comprimento médio ponderado das fibras (pontos de dados vazios) durante os tratamentos sem carga / **Figure 6.** Development of the pulp handsheet tear strength (filled data points) and average length-weighted fibre length (hollow data points) during the no-load treatments

Decomposição da energia de refinação

A aplicação do balanço energético geral anteriormente apresentado (Equação 2) e modificado para o processo de refinação estudado, resulta em:

$$W_{\text{entrada}} - Q_{\text{saída}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad \text{Equação 4}$$

já que se supôs que os componentes $E_{\text{entrada de massa}}$, $E_{\text{saída de massa}}$, $Q_{\text{de entrada}}$ e $W_{\text{de saída}}$ fossem todos iguais a zero. O estabelecimento teórico de um balanço pode parecer simples e fácil, enquanto a sua aplicação pode estar associada a problemas na determinação confiável dos componentes. Isto se deve, sobretudo, a interações entre as fibras e a natureza viscoelástica das fibras celulósicas. A energia despendida em modificação das fibras, de acordo com a Figura 1, pode ser subdividida em caráter adicional da maneira mostrada na Figura 7.

Portanto, uma parcela preponderante, ou até mesmo a totalidade, da energia elétrica de processo introduzida seria convertida em calor sensível em alguma fase do processo. Alguns autores têm afirmado que o aumento da temperatura da massa é um sintoma de energia desperdiçada (North e Samuels 1948). Diversos autores têm estimado a dissipação da energia de refinação efetiva: Kraske e Koon (1956) calcularam que 98%–100% da mesma aparecia como calor sensível; Motshman (1931), Milne (1936) e Westman (1984) propuseram dissipação total da energia de refinação. Nordman *et al.* (1981) estimaram que 90%–95% da energia elétrica de entrada transformava-se em calor. Nissan (1977) explicou isto ao propor um mecanismo em que a energia despendida entre as barras do refinador em deformar elasticamente as fibras é relaxada por vibrações amortecidas e convertida em calor quando as fibras são liberadas. Atalla e Wahren (1980) sustentaram o mesmo parecer

Refining energy break down

Application of the general energy balance earlier presented (Equation 2) and modified for the studied refining process turn into:

$$W_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = \Delta E_{\text{system}} \quad \text{Equation 4}$$

since the components $E_{\text{mass,in}}$, $E_{\text{mass,out}}$, Q_{in} and W_{out} all were assumed to be zero. Theoretical set-up of a balance may seem straightforward, whereas its application may be associated with problems in reliable determination of the components. This is mainly due to fibre interactions and the viscoelastic nature of pulp fibres. The energy spent on fibre modification, according to Figure 1, may further be sub-divided as shown in Figure 7.

Thus, a majority, or even all, of the introduced electric process energy would be converted into sensible heat at some stage. Some authors have felt that the rise in stock temperature is a symptom of wasted energy (North and Samuels 1948). Several authors have estimated the dissipation of the effective refining energy: Kraske and Koon (1956) calculated that 98%–100% of this appeared as sensible heat; Motshman (1931), Milne (1936) and Westman (1984) proposed total refiner energy dissipation. Nordman *et al.* (1981) estimated that 90%–95% of the input electrical energy turned into heat. Nissan (1977) has explained this by proposing a mechanism where the energy spent between refiner bars on elastically straining the fibres is relaxed by damped vibrations and turned into heat when the fibres are released.

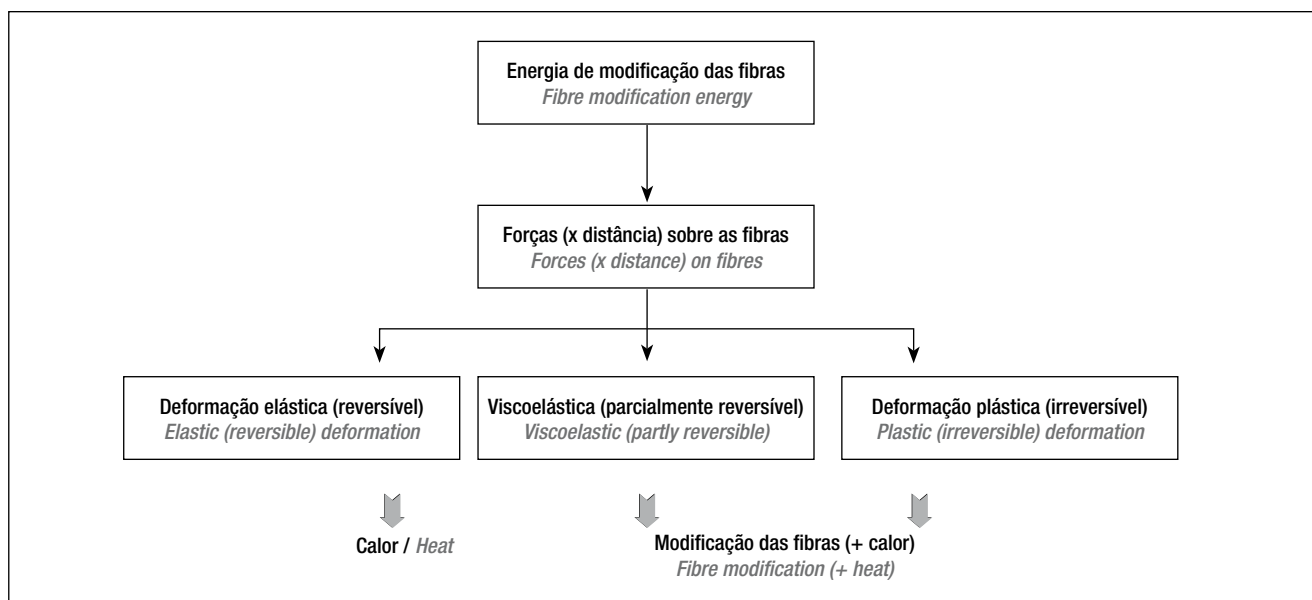


Figura 7. Decomposição da energia de modificação das fibras em deformações reversíveis e irreversíveis da parede celular das fibras. A energia mecânica introduzida é principalmente dissipada em forma de calor / **Figure 7.** Break down of fibre modification energy into reversible and irreversible fibre cell wall deformations. The introduced mechanical energy is mainly dissipated into heat

numa discussão sobre a eficiência da LCR e salientaram que a energia de formação de novas ligações é liberada como calor de energia térmica, independentemente do fato de as fibrilas recém-formadas serem umedecidas para produzir interfaces estáveis entre as fibras e a água, ou para restaurar ligações interfibrilares através de pontes de hidrogênio. Tem sido demonstrado que celuloses secas e úmidas liberam calor ao serem umedecidas por fluidos próticos (Wahba 1948). Wahba (1950) relatou que celuloses secas foram totalmente umedecidas com água em menos de 10 minutos, sendo um valor de platô atingido em seguida. Geralmente, substâncias ligadas por pontes de hidrogênio (como, p. ex., água, álcoois e ácidos hidroxílicos) apresentam elevados pontos de congelamento e de ebulição, denotando altas energias de comutação de fase (fusão e vaporização). Estas, portanto, consomem energia, ao passo que ocorre o inverso (liberação de energia) durante a condensação e a solidificação (congelamento) ao serem (re)formadas ligações por pontes de hidrogênio. Este comportamento implica o fato de que o umedecimento de novas superfícies de fibras em LCR gera calor.

Modelo de balanço energético

Para o presente caso, com o refinador de laboratório, que representa um sistema dinâmico, é necessário esclarecer as mudanças em termos de energia interna, registradas pela sua temperatura, bem como perdas de calor. Isto pode ser feito mediante a formulação de uma equação que descreva o desenvolvimento da temperatura do sistema de refinação, supondo-se uma dissipação total da energia (detalhes podem ser obtidos no Apêndice). Com base na análise, um balanço energético de um sistema de refinação apresentar-se-ia da seguinte forma:

$$W_{in} = E_{E,in} \cos \varphi = E_F + \Phi_{Idl} + \Phi_{Mech} = \frac{dU}{dt} + \Phi_{Env}$$

Equação 5

onde:

W_{in} = trabalho do eixo introduzido (kW/s ou kJ)

$E_{E,in}$ = energia elétrica de entrada (kJ), e

$\cos \varphi$ = eficiência nominal do motor (0,85),

E_F = energia de modificação das fibras (kJ),

Φ_{Idl} = perdas hidrodinâmicas em funcionamento sem carga (kJ),

Φ_{Mech} = perdas mecânicas nos mancais (kJ),

dU/dt = alteração na energia do sistema, e

Φ_{Env} = perdas de calor para o meio ambiente (kJ).

O trabalho mecânico do eixo introduzido como potência do eixo do refinador é igual à alteração da energia interna reduzida para perdas de calor.

Uma estimativa comparativa da decomposição da energia de refinação introduzida revelou que o sistema de refinação de laboratório pode comportar-se de maneira muito seme-

Atalla and Wahren (1980) supported the same view in a discussion on LCR efficiency and pointed out that the energy of formation of new bonds is released as thermal energy—heat—irrespective of the newly formed fibrils are wetted to produce stable fibre-water interfaces or to reform interfibrillar hydrogen bonds. It has been shown that dry and moist celluloses release heat upon wetting by protic fluids (Wahba 1948). Wahba (1950) reported that dry celluloses were fully wetted with water in less than 10 minutes whereafter a plateau value is reached. Generally, hydrogen bonded substances (e.g. water, alcohols and hydroxyl acids) exhibit high freezing and boiling points, denoting high energies of phase shifting (melting and vaporisation). These, hence, consume energy whereas the reverse (energy release) occurs during condensation and solidification (freezing) as hydrogen bonds are (re)formed. This behaviour implies that wetting of new fibre surfaces in LCR generates heat.

Energy balance model

For the present case with the laboratory refiner, which represents a dynamic system, it is necessary to account for the changes in internal energy, registered by its temperature, and heat losses. This can be done by formulating an equation describing the refiner system temperature development, assuming full energy dissipation (for details the reader is referred to the Appendix). Based on the analysis an energy balance of a refining system would turn out as follows:

$$W_{in} = E_{E,in} \cos \varphi = E_F + \Phi_{Idl} + \Phi_{Mech} = \frac{dU}{dt} + \Phi_{Env}$$

Equation 5

where:

W_{in} = introduced shaft work (kW/s or kJ)

$E_{E,in}$ = input electrical energy (kJ), and

$\cos \varphi$ = motor nominal efficiency (0.85),

E_F = fibre modification energy (kJ),

Φ_{Idl} = hydrodynamic idling losses (kJ),

Φ_{Mech} = mechanical bearing losses (kJ),

dU/dt = change in the system energy, and

Φ_{Env} = heat losses to environment (kJ).

The mechanical shaft work introduced as refiner shaft power equals the change in internal energy reduced for heat loss.

A comparative estimate of the break down of the introduced refining energy revealed that the laboratory refining system may behave close to an ideal

lhante a um sistema ideal no estágio inicial, pois as perdas térmicas ambientais, causadas por diferenças de temperatura, são pequenas – ver Figura 8. Isto implica o fato de que uma esmagadora maioria, ou até mesmo a totalidade da energia mecânica de refinação fornecida, no final foi convertida em calor, e contradiz a afirmação: “...a contribuição da potência sem carga não é totalmente convertida em calor”, feita anteriormente (Basile 1984). O autor fez referência ao trabalho de Amero (1980), no qual se considerou que a potência sem carga aumentava a drenagem da polpa. Levlin (1988) argumentou que a potência de funcionamento sem carga produz certo grau de refinação das fibras. Portanto, a contribuição da potência sem carga introduz energia que produz alterações (de pequena monta) nas fibras e que no fim é convertida em calor. Siewert e Selder (1980) procederam a uma decomposição semelhante da potência do refinador. Eles propuseram que a parcela da potência do refinador que contribui para o consumo de energia da circulação de massa, medida como nível de potência sem carga com massa, se reduz em função do grau de refinação. Tal redução pode se dever a modificações das fibras, resultando em crescente flexibilidade das mesmas, a qual reduz a resistência da rede das fibras (Wikström 2002). Da mesma forma, uma temperatura mais elevada reduz a viscosidade da água.

Visando a simplificação, a potência medida do eixo do

system in the early stage as the environmental heat losses caused by temperature differences are small, Figure 8. This implies that a large majority or even all of the supplied mechanical refining energy in the end was converted into heat, and contradicts the statement: “...the no load power contribution is not totally converted into heat” earlier made (Basile 1984). The author referred to the work of Amero (1980) where the no load power was seen to increase the pulp drainage. Levlin (1988) argued that the idling power induces a certain amount of refining to the fibres. The no load power contribution thus introduces energy that produces (minor) changes in fibres and that in the end is converted into heat. Siewert and Selder (1980) made a similar breakdown of the refiner power. They proposed that the refiner power share contributing to the energy consumption of stock circulation, measured as no-load power level with stock, decreases with degree of refining. Such a reduction can be due to fibre modifications leading to increasing fibre flexibility that reduces the network strength of the fibres (Wikström 2002). Also a higher temperature will reduce the water viscosity.

For simplification, the measured refiner shaft power was considered a constant, and an average

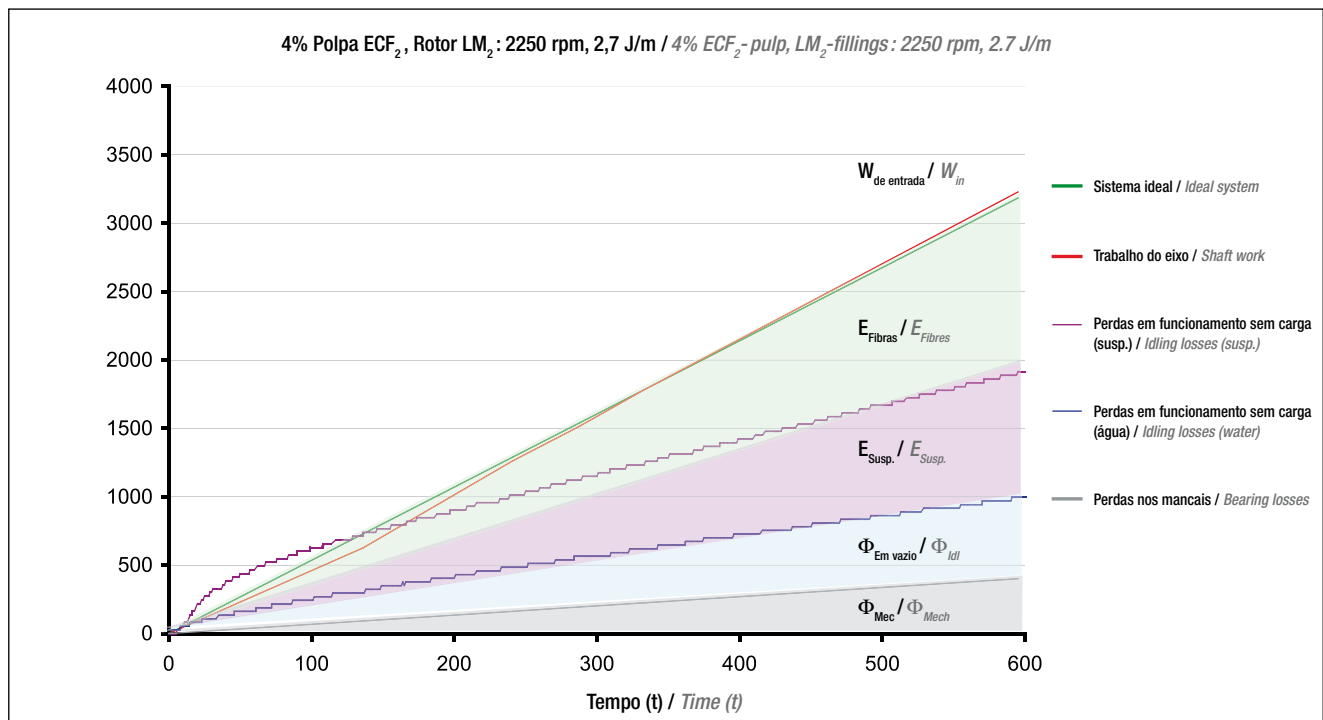


Figura 8. Um exemplo de uma decomposição estimativa de energia por componentes de dissipação: o trabalho do eixo de entrada, W_{in} ; a energia de modificação das fibras, E_{Fibres} , que inclui o trabalho consumido pelas interações entre as fibras, E_{Susp} ; as perdas de potência de funcionamento sem carga (determinadas somente com água), T_{idl} ; e as perdas nos mancais, Φ_{Mech} . Os dados não são do presente trabalho; gráfico de (Lundin 2008)

Figure 8. An example of an estimative energy breakdown by dissipation components: the input shaft work, W_{in} ; the fibre modification energy, E_{Fibres} , which includes the work consumed by the fibre-fibre interactions, E_{Susp} ; the idling power losses (as determined with water only), T_{idl} ; and the bearing losses, Φ_{Mech} . Data not from present paper; graph from (Lundin 2008)

refinador foi considerada uma constante, tendo sido adotado um valor médio. O valor do coeficiente de convecção total, hA , foi estimado matematicamente, mediante a utilização das temperaturas medidas, e a temperatura do modelo calculada por meio da equação do balanço energético. Portanto, o hA estimado inclui todas as perdas de calor, inclusive as trocas de calor convectivo. Para prosseguir, consideramos m_f , m_w e m_s como a massa das fibras, água e aço, respectivamente, com valores de calor específico de 1,5, 4,19 e 0,46 kJ/kgK. O fator mc foi calculado como

$$mc = m_f c_f + m_w c_w + m_s c_s \quad \text{Equação 6}$$

O valor do calor específico médio c foi calculado da

$$c = (m_f c_f + m_w c_w + m_s c_s) / m \quad \text{Equação 7}$$

A fim de considerar a energia de refinação fornecida mecanicamente como potência do eixo, foi estabelecido um modelo de balanço energético baseado na Primeira Lei da Termodinâmica (Equação 19, no Apêndice). Mediante o reordenamento desta expressão e a aplicação das hipóteses apresentadas no Apêndice, foi formulado e testado o seguinte modelo:

$$T = T_{in} + \frac{P_{tot}}{hA} \left(1 - e^{-\frac{hAt}{mc}} \right) \quad \text{Equação 8}$$

O modelo de balanço proposto foi aplicado aos dados adquiridos mediante a utilização do refinador ProLab™. Aplicando-se a Equação 8, os dados que representam a temperatura do sistema de refinação em função do tempo de tratamento foram plotados na Figura 9.

O modelo produziu melhores ajustes com períodos de tempo mais longos e poderia ser usado para descrever a taxa de acúmulo de energia do sistema. Os ajustes foram os melhores quando o sistema se aproximou do estado constante, ao ser aumentada a energia interna do sistema, medida na forma de uma temperatura mais elevada. O nível de temperatura constante indica uma mudança do estado dinâmico, transitório, para um estado constante, em que a entrada de energia é igual às perdas de calor. Tal estado foi mais evidente no caso de 0% (Figura 9), ponto em que a temperatura do sistema quase atingiu um platô. Ficou claro que uma consistência mais alta da polpa requeria mais potência do refinador para a rotação-alvo de 2250 rpm, implicando uma viscosidade mais alta da suspensão devido a mais interações entre as fibras. Isto se deveu ao maior número de interações entre as fibras, bem como entre as fibras e a água. A potência do eixo de entrada gerava trabalho mecânico que era dissipado como calor: uma potência mais alta resultava numa transferência de energia mais rápida, o que se refletia na forma

value was adopted. The value of the overall convection coefficient, hA , was estimated mathematically using the measured temperatures and the model temperature calculated by the energy balance equation. Hence, the estimated hA includes all heat losses, including the convective heat exchanges. To proceed we consider m_f , m_w and m_s as the mass of the fibres, water and steel respectively with specific heat values of 1.5, 4.19 and 0.46 kJ/kgK. The factor mc was calculated as

$$mc = m_f c_f + m_w c_w + m_s c_s \quad \text{Equation 6}$$

The value of the average specific heat value c was calculated from

$$c = (m_f c_f + m_w c_w + m_s c_s) / m \quad \text{Equation 7}$$

In order to consider the refining energy supplied mechanically as shaft power, an energy balance model based on the First Law of Thermodynamics was set up (Equation 19 in Appendix). By rearranging this expression, and applying the hypotheses presented in the Appendix, the following model was formulated and tested:

$$T = T_{in} + \frac{P_{tot}}{hA} \left(1 - e^{-\frac{hAt}{mc}} \right) \quad \text{Equation 8}$$

The proposed balance model was applied to the data acquired using the ProLab™ refiner. Using Equation 8, the data representing the refiner system temperature as function of treatment time were plotted in Figure 9.

The model produced better fits at longer times and could be used to describe the system's rate of energy accumulation. The fits were best when the system approached the steady state as the system's internal energy was increased, measured as a higher temperature. The constant temperature level indicates a change from the dynamic, transient state to a steady state where the energy input equals the heat losses. Such a state was most apparent in the 0% case (Figure 9) where the system temperature almost reached a plateau. It was clear that a higher pulp consistency required more refiner power for the target rotational speed 2250 rpm, implying a higher suspension viscosity due to more fibre-fibre interactions. This was due to the greater amount of fibre-fibre and fibre-water interactions. The input shaft power created mechanical work that was dissipated as heat: a higher power led to a faster energy transfer that was reflected as a more

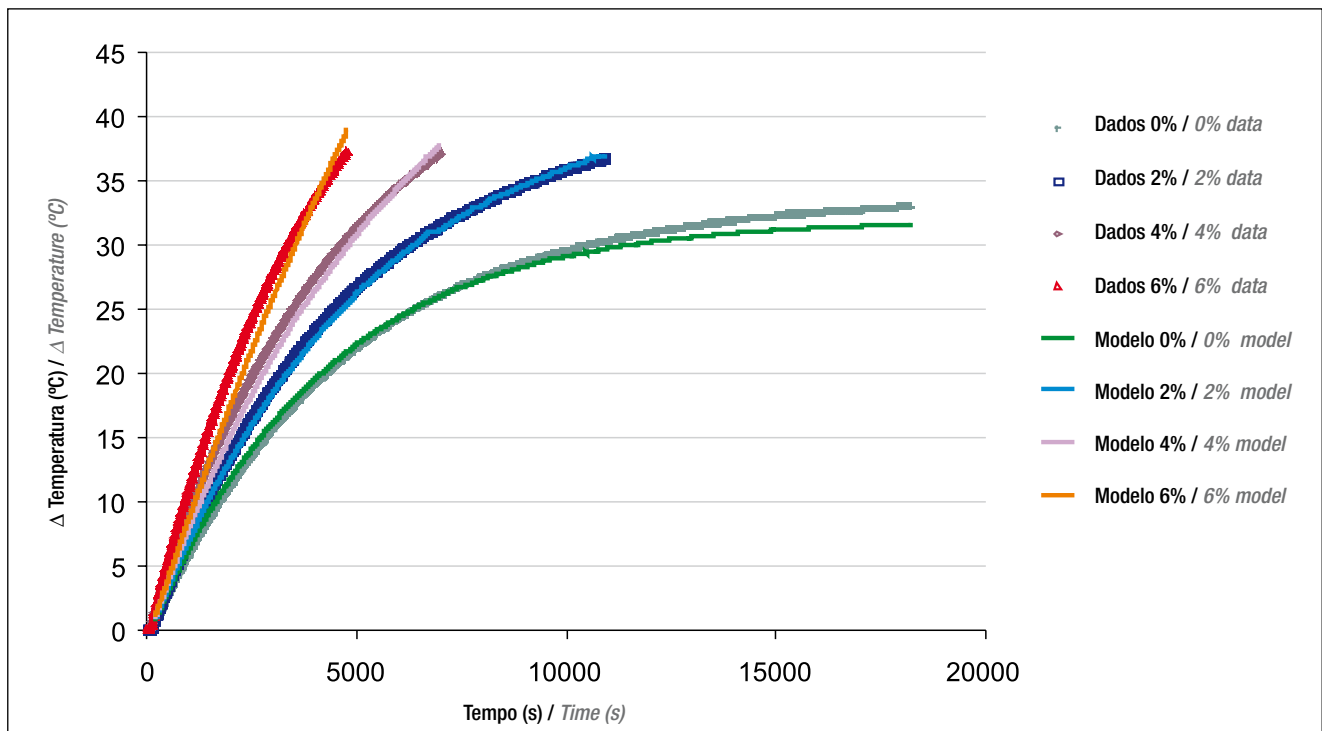


Figura 9. Temperatura de processo do sistema de refinação em relação ao tempo para os ensaios de refinação realizados, rotulados de acordo com a consistência da polpa. A tendência rotulada como 0% corresponde ao ensaio realizado sem fibras (somente água) / **Figure 9.** Refiner system process temperature versus time for the refining trials performed labelled according to pulp consistency. The trend labelled 0% corresponds to the trial performed without fibres (water only)

de elevação mais rápida da temperatura do sistema de refinação. Um sistema adiabático ideal ganharia, e manteria, todo o calor introduzido sem perdas, e a temperatura seria, portanto, uma função linear do tempo. O sistema de refinação de laboratório incluiu tal estado na medida em que mais energia foi introduzida durante um período de tempo mais curto – ver Figura 9.

Os valores paramétricos usados nas estimativas do modelo apresentadas na Figura 9 estão relacionados na Tabela 1.

Potência e eficiência

A potência total do eixo, fornecida ao sistema de refinação, foi parcialmente consumida em refinação efetiva, o que

rapid rise in the refiner system temperature. An ideal adiabatic system would gain, and keep, all introduced heat without losses and the temperature would hence be a linear function of time. The laboratory refiner system enclosed such a state as more energy was introduced during a shorter period of time, Figure 9.

The parameter values used in the model estimations presented in Figure 9 are listed in Table 1.

Power and efficiency

The total shaft power supplied to the refining system was partly consumed on effective refining,

Tabela 1. Valores paramétricos do balanço energético referentes aos ensaios realizados com consistências da polpa de 2%, 4% e 6%

Table 1. Energy balance parameter values of the trials performed at the pulp consistencies 2%, 4% and 6%

Parâmetro / Parameter	Unidade / Unit	Valor / Value		
		2%	4%	6%
Potência do refinador (P_{tot}) Refiner power (P_{tot})	kW	2,26	2,52	2,73
Quantidade de fibras (m) Amount of fibres (m)	kg	1,02	2,08	3,19
Fator de convecção x Superfície de convecção (hA) Convection factor x Convection surface (hA)	kJ/K.s	0,053	0,045	0,022
Massa x Calor específico (mc) Mass x Specific heat (mc)	kJ/K	270,8	272,4	274,1
Calor específico (c) Specific heat (c)	kJ/kgK	1,496	1,496	1,496

se refletiu em forma de alterações em propriedades da polpa. Em LCR, a energia que não é diretamente destinada para modificação das fibras, comumente designada como potência de funcionamento sem carga (P_{idl}), é tradicionalmente determinada mediante a operação do refinador com discos recuados, usando-se suspensão de polpa. É conhecido o fato de que a energia introduzida como potência sem carga gera alterações em fibras celulósicas. Todavia, informações sobre o grau dessas modificações não estão bem documentadas. Em LCR, a potência efetiva (P_{net}) corresponde à parcela da potência total que se considera que é transferida para as fibras como energia mecânica. Essa potência efetiva pode ser calculada pela diferença entre a potência total e a potência de funcionamento sem carga nas condições aplicadas:

$$P_{efetiva} = P_{total} - P_{de\ funcionamento\ sem\ carga} \quad \text{Equação 9}$$

Com estes parâmetros, a eficiência do processo pode ser estimada pela definição geral do coeficiente momentâneo de eficiência energética (η):

$$\eta = \frac{P_{efetiva}}{P_{total}} = \frac{P_{efetiva}}{P_{efetiva} + P_{de\ funcionamento\ sem\ carga}} \quad \text{Equação 10}$$

Assim, a parcela da potência sem carga P_{idl} afetará diretamente a eficiência do processo. Aplicando-se estes conceitos aos dados obtidos, ficou evidente que, dentre os ensaios realizados, o de refinação com 6% de consistência da polpa foi o mais eficiente, enquanto o de refinação com 2% de consistência da polpa foi o menos eficiente de todos. A partir daí pode-se concluir que a eficiência da energia de processo é proporcional à consistência da polpa, desde que mantidos constantes os demais parâmetros de processo. Isto está bem de acordo com descobertas anteriores do autor principal: a consistência da polpa – um parâmetro-chave em retenção de fibras – é crucial para a cobertura das barras do refinador (Batchelor 2006, Lundin 2008b), que determina a eficiência da energia de refinação neste trabalho. Os valores obtidos para a potência total, a potência efetiva e o coeficiente de eficiência energética são apresentados na Tabela 2.

which was reflected as changes in pulp properties. In LCR the energy not directly assigned for fibre modification, commonly termed idling power (P_{idl}), is traditionally determined by running the refiner with plates backed off using pulp suspension. It is known that the energy introduced as no-load power generates changes in pulp fibres. Information on the rate of these changes are, however, not well-documented. In LCR the net power (P_{net}) corresponds to the share of the total power that is considered to be transferred onto fibres as mechanical energy. This net power can be calculated by the difference between the total power and the idling power at the applied conditions:

$$P_{net} = P_{tot} - P_{idl} \quad \text{Equation 9}$$

With these parameters, the process efficiency can be estimated by the general definition of the momentary energy efficiency coefficient (η):

$$\eta = \frac{P_{net}}{P_{tot}} = \frac{P_{net}}{P_{net} + P_{idl}} \quad \text{Equation 10}$$

The share of the no-load P_{idl} will thus directly affect the process efficiency. Applying these concepts to the data obtained it was apparent that, of the trials performed, refining at 6% pulp consistency was the most efficient while refining at 2% pulp consistency was the least efficient. From this, we can conclude that the process energy efficiency is proportional to the pulp consistency, provided otherwise constant process parameters. This is well in line with previous findings of the main author: the pulp consistency – a key parameter in fibre trapping – is crucial for the refiner bar coverage (Batchelor 2006, Lundin 2008b), which herein determines the refining energy efficiency. The values obtained for the total, net power and energy efficiency coefficient are presented in Table 2.

Tabela 2. Variação do consumo total de energia (TEC), do consumo específico de energia (SEC) e do coeficiente de eficiência energética (η) em função da consistência / **Table 2.** Total energy consumption (TEC), specific energy consumption (SEC) and energy efficiency coefficient (η) variation with consistency

Cons.		(% em p.) (w-%)	2 %	4 %	6 %
Por pass. Per pass	SEC	(kWh/t)	0,091	0,110	0,108
	TEC	(kWh/t)	0,629	0,454	1,130
Amostra / Sample		(-)	2	2	2
TEC		(MWh/t)	7,12	2,55	1,25
SEC		(MWh/t)	4,91	1,84	0,93
η		(-)	0,69	0,72	0,74

Com consistência mais alta da polpa, o maior número de fibras e o seu número de interações se refletiram como potência requerida mais alta para determinada taxa de cisalhamento no afastamento de refinação de 1 mm. Ficou demonstrado que o número teórico de contatos entre as fibras, designado como fator de aglomeração das fibras, constitui uma lei de potência do comprimento das fibras, sendo proporcional à consistência da polpa (Kerekes e Schell 1992). Além disso, anteriormente se demonstrou que uma suspensão fibrosa requer uma quantidade de energia, específica ao tipo de fibra, para atingir o nível de turbulência indicado pelo ponto de início para fluidificação (Gullichsen e Härkönen 1981, Bennington 1996, Chen e Chen 1997). Portanto, na medida em que mais fibras estão presentes numa suspensão, isto é, a consistência da polpa aumenta, as mesmas interagem em maior grau, requerendo, assim, mais energia para a deformação dos flocos de fibras e a ruptura da rede com determinada taxa de cisalhamento, isto é, para deformar-se e deslocar-se ao serem submetidas a forças (de cisalhamento). Essas interações entre as fibras também têm sido descritas como o coeficiente de atrito da polpa (Dietemann e Roux 2005).

Na refinação da polpa, as fibras em suspensão estão sujeitas a deformação cíclica em função de várias forças heterogêneas nas barras (Batchelor e Ouellet 1997, Martinez *et al.* 1997, Batchelor *et al.* 1997). Isto produz tanto alterações desejadas como indesejadas na estrutura e na morfologia da parede celular da fibra. Os resultados apresentados indicaram que o desenvolvimento das propriedades das fibras não só dependia da energia fornecida às fibras, mas também da consistência da polpa usada. A quantidade de fibras presentes entre as barras é um parâmetro-chave, responsável pela reação das mesmas à energia de refinação aplicada, que se compõe das forças e seu comprimento efetivo (Kerekes e Senger 2003). Isto decidirá a eficiência do processo (Lundin 2008), bem como a real intensidade do tratamento (Lundin 2008b). Portanto, a maneira pela qual – o quão uniformemente – as forças se distribuem durante os cruzamentos das barras entre as fibras retidas pelas arestas das barras, uma condição absoluta para uma refinação bem-sucedida, é decisiva para o resultado da refinação.

CONCLUSÃO

Um sistema de refinação de laboratório pôde ser modelado mediante a aplicação da termodinâmica, tendo sido empregado para equilibrar a energia mecânica de entrada, fornecida na forma de trabalho do eixo, com a dissipação de energia, conforme refletido pelo equivalente mecânico de calor. O grau de aquecimento do sistema foi diretamente dependente da potência de entrada do refinador, ou trabalho do eixo. O modelo correspondia tanto melhor aos dados do refinador quanto mais o estado dinâmico, transitório, passava para o estado constante em que a energia de entrada compensava as perdas de calor. O

At a higher pulp consistency, the greater number of fibres, and their number of interactions, were reflected as higher power requirements for a given shear rate in the 1 mm refining gap. The theoretical number of fibre contacts, denoted fibre crowding factor, has been shown to be a power law of fibre length and is proportional to pulp consistency (Kerekes and Schell 1992). Further, it has previously been shown that a fibrous suspension requires an amount of energy, specific to the fibre type, to reach the turbulence level indicated by the point of onset for fluidisation (Gullichsen and Härkönen 1981, Bennington 1996, Chen and Chen 1997). Hence, as more fibres are present in a suspension, i.e. the pulp consistency increases, these interact to a greater extent and require thus more energy for fibre floc deformation and network breakdown at a given shear rate, i.e. to strain and move when subjected to (shear) forces. These fibre interactions have also been described as the friction coefficient of the pulp (Dietemann and Roux 2005).

In pulp refining, the suspended fibres are subject to cyclical strain by various and heterogeneous bar forces (Batchelor and Ouellet 1997, Martinez et al. 1997, Batchelor et al. 1997). This produces both desired and undesired changes in the fibre cell wall structure and morphology. The presented results indicated that the development of fibre properties not only depended on the energy supplied to the fibres, but also on the pulp consistency used. The amount of fibres present between bars is a key parameter responsible for their response to the applied refining energy, which is composed of the forces and their effective length (Kerekes and Senger 2003). This will decide the process efficiency (Lundin 2008) as well as the real treatment intensity (Lundin 2008b). Thus the way – how evenly – forces are distributed during bar crossings amongst the fibres trapped by bar edges, an absolute condition for successful refining, is decisive for the refining outcome.

CONCLUSION

A laboratory refiner system could be modelled by application of thermodynamics and was employed to balance the input mechanical energy, supplied as shaft work, with the energy dissipation, as reflected by the mechanical equivalent of heat. The system's rate of heating was directly dependent on the input refiner power, or shaft work. The model fitted the refiner data better the more the dynamic, transient state passed onto the steady state where the input energy balanced the

nível de potência, ou quantidade de trabalho introduzido, para determinada taxa de cisalhamento foi determinado pelo nível de intra- e interações entre a água e as fibras, e, portanto, pela consistência da polpa. Os resultados implicam que o tratamento sem carga, realizado com espaçamento entre fâscas de 1,0 mm, afetou claramente as dimensões das fibras e a quantidade de fibras por volume, isto é, a consistência da polpa, determinando a forma do tratamento das fibras. No caso estudado, que representa um tratamento muito suave das fibras, a taxa de transferência de energia foi uma variável-chave responsável pelo grau de modificação em diferentes propriedades das fibras celulósicas e da folha. O sistema de laboratório comportou-se como aplicações industriais convencionais de refinação de polpa no que se refere ao desenvolvimento das propriedades da polpa, embora numa escala de tempo diferente devido aos baixos níveis de potência do refinador e, por conseguinte, taxas de transferência de energia muito pequenas. Geralmente, a eficiência da energia de processo foi favorecida por uma consistência mais alta da polpa. Investigações adicionais avaliarão a maneira pela qual outras variáveis de refinação afetam as propriedades das fibras e da folha.

Agradecimentos

Transmitem-se agradecimentos à Metso Paper pelo apoio tecnológico e financeiro.

Apêndice

Modelo de Balanço Energético

Da Primeira Lei da Termodinâmica se obtém:

$$\frac{d}{dt}(\underline{U} + \underline{E}_p + \underline{E}_k) = \Phi - \tau \pm \sum M(H + E_p + E_k)$$

Equação 11

sendo:

\underline{U} = energia interna (kJ)

\underline{E}_p = energia potencial (kJ)

\underline{E}_k = energia cinética (kJ)

Φ = perdas de calor (kW)

τ = trabalho do eixo = $-P_{tot}$ (potência total ou potência de refinação) (kW)

M = fluxo de massa (kg/s)

H = entalpia por massa unitária (kJ/kg)

E_p = energia potencial por massa unitária (kJ/kg)

E_k = energia cinética por massa unitária (kJ/kg).

Hipótese

- O fluido (suspensão de polpa) é incompressível
- A temperatura é constante numa seção
- O calor específico com pressão constante (c_p) é igual ao calor específico com volume constante (c_v) e são ambos designados como c

heat losses. The power level, or amount of input work, for a given shear rate was determined by the level of water and fibre intra- and interactions, and thus the pulp consistency. The results imply that the no load treatment, performed at gap clearance 1.0 mm, clearly affected the fibre dimensions and the amount of fibres per volume, i.e. the pulp consistency, determined the mode of the fibre treatment. In the studied case, representing a very mild fibre treatment, the energy transfer rate was a key variable responsible for the rate of change in different pulp fibre and sheet properties. The laboratory system behaved as conventional industrial pulp refining applications regarding pulp property development, but, however, on a different time scale due to the low refiner power levels and thus very small energy transfer rates. Generally, the process energy efficiency was favoured by a higher pulp consistency. Further investigations will assess how other refining variables affect the fibre and sheet properties.

Acknowledgements

Metso Paper is acknowledged for technological and financial support.

Appendix

Energy Balance Model

From the First Law of Thermodynamics we get:

$$\frac{d}{dt}(\underline{U} + \underline{E}_p + \underline{E}_k) = \Phi - \tau \pm \sum M(H + E_p + E_k)$$

Equation 11

where:

\underline{U} = internal energy (kJ)

\underline{E}_p = potential energy (kJ)

\underline{E}_k = kinetic energy (kJ)

Φ = heat losses (kW)

τ = shaft work = $-P_{tot}$ (total power or refining power) (kW)

M = mass flow (kg/s)

H = enthalpy per unit mass (kJ/kg)

E_p = potential energy per unit mass (kJ/kg)

E_k = kinetic energy per unit mass (kJ/kg).

Hypothesis

- *The fluid (pulp suspension) is incompressible*
- *The temperature is constant in a section*
- *The specific heat at constant pressure (c_p) equals the specific heat at constant volume (c_v) and are both called c*

- O valor de c é constante no processo
- As energias cinética e potencial (E_k e E_p) são consideradas desprezíveis
- Uma vez que as perdas térmicas se devem, em sua maioria, a perdas convectivas ao ar circundante, a condução através do aço é desprezada, bem como a convecção internamente à maquinaria.

Sabe-se que:

$$\underline{U} = m \cdot c_p \cdot T \text{ (kJ)} \quad \text{Equação 12}$$

m = permanência da massa dentro do sistema, o que compreende a água, peças metálicas e fibras (kg)

c_p = calor específico com pressão constante (kJ/kgK)

T = temperatura do sistema (K)

Aplicando-se a hipótese, pode-se escrever:

$$\Phi = -hA(T - T_\infty) \text{ (kW)} \quad \text{Equação 13}$$

hA = coeficiente de convecção global, inclusive a área superficial de convecção (kJ/Ks)

T_∞ = temperatura circundante (K)

Designando como H_{in} a entalpia no início do volume de controle e H_{out} a entalpia de saída, o modelo geral do balanço energético passa a ser:

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_\infty) + P_{tot} + M(H_{in} - H_{out}) \quad \text{Equação 14}$$

O volume de controle em que esta equação é aplicada compreende o misturador, a bomba de massa e o refinador (Figura 2).

Para um fluido incompressível sabe-se que:

$$H_{in} - H_{out} = U_{in} - U_{out} + v(P_{in} - P_{out}) = c(T_{in} - T) + v(P_{in} - P_{out}) \quad \text{Equação 15}$$

sendo v o volume específico do fluido ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$) e P_{out} e P_{in} a pressão de saída e a pressão de entrada, respectivamente, enquanto U_{in} e U_{out} são as energias internas de entrada e de saída. T_{in} é a temperatura no início do volume de controle para cada ciclo de refinação e T é a temperatura do fluido internamente ao volume de controle, que é considerado constante para cada ciclo.

A temperatura inicial do fluido T_{in} foi aproximadamente a mesma que a temperatura circundante T_∞ . Portanto, pode-se considerar T_{in} como constante no início do ensaio. Ao ser iniciado o processo, a temperatura T_{in} apresentará aproximadamente o mesmo valor da temperatura internamente ao refinador T . Então é razoável desprezar a fração $T_{in} - T$ na Equação 15.

Como o termo $P_{in} - P_{out}$ na Equação 15 apresenta um

- The value of c is constant in the process
- The kinetic and potential energies (E_k and E_p) are considered negligible
- As the heat losses are mostly due to convective losses to the surrounding air, the conduction through the steel is neglected, as well as the convection inside the machinery.

It is known that:

$$\underline{U} = m \cdot c_p \cdot T \text{ (kJ)} \quad \text{Equation 12}$$

m = mass holdup inside the system, which comprehends the water, metal parts and the fibres (kg)

c_p = specific heat at constant pressure (kJ/kgK)

T = temperature of the system (K)

Applying the hypothesis, we may write:

$$\Phi = -hA(T - T_\infty) \text{ (kW)} \quad \text{Equation 13}$$

hA = overall convection coefficient including the surface area of convection (kJ/Ks)

T_∞ = surrounding temperature (K)

Calling H_{in} the enthalpy at the beginning of the control volume and H_{out} the outgoing enthalpy, the general energy balance model turns into:

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_\infty) + P_{tot} + M(H_{in} - H_{out}) \quad \text{Equation 14}$$

The control volume where this equation is applied comprehends the mixer, the stock pump and the refiner (Figure 2).

For an incompressible fluid it is known that:

$$H_{in} - H_{out} = U_{in} - U_{out} + v(P_{in} - P_{out}) = c(T_{in} - T) + v(P_{in} - P_{out}) \quad \text{Equation 15}$$

where v is the specific volume of the fluid ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$), P_{out} and P_{in} are the outlet and inlet pressure, respectively, whereas U_{in} and U_{out} are the inlet and outlet internal energies. T_{in} is the temperature at the beginning of the control volume for each refining cycle and T is fluid temperature inside the control volume, which is considered constant for each cycle.

The initial fluid temperature T_{in} was about the same as the surrounding temperature T_∞ . Hence we can consider T_{in} constant at the beginning of the trial. As the process is started, the temperature T_{in} will have nearly the same value of the temperature inside the refiner T . Then it is reasonable to neglect the fraction $T_{in} - T$ in Equation 15.

As the term $P_{in} - P_{out}$ in Equation 15 has a small

valor pequeno, ele pode ser desprezado sem que haja alterações consideráveis na equação do balanço. Em consequência, pode-se supor que a entalpia não apresente uma modificação significativa durante o processo, podendo, portanto, ser ignorada.

Reescrevendo-se a Equação 14 sem o termo da entalpia, temos:

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_{\infty}) + P_{tot} \quad \text{Equação 16}$$

Um reordenamento proporciona:


$$\frac{dT}{-hA(T - T_{in}) + P_{tot}} = \frac{dt}{mc} \quad \text{Equação 17}$$

Uma integração adicional da expressão acima resulta em:

$$\ln \left[\frac{-hA(T - T_{in}) + P_{tot}}{P_{tot}} \right] = -\frac{hAt}{mc} \quad \text{Equação 18}$$

Esta pode ser reordenada em caráter adicional para:

$$T = T_{in} + \frac{P_{tot}}{hA} \left(1 - e^{-\frac{hAt}{mc}} \right) \quad \text{Equação 19}$$

Esta é a equação final do balanço energético, apresentada e aplicada aos dados. 

value, it can be neglected without considerable changes in the balance equation. As a consequence, we can make the assumption that the enthalpy does not present a significant change during the process and can thus be ignored.

Rewriting Equation 14 without the enthalpy term gives:

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_{\infty}) + P_{tot} \quad \text{Equation 16}$$

A rearrangement provides:


$$\frac{dT}{-hA(T - T_{in}) + P_{tot}} = \frac{dt}{mc} \quad \text{Equation 17}$$

Further integration of the expression above yields:

$$\ln \left[\frac{-hA(T - T_{in}) + P_{tot}}{P_{tot}} \right] = -\frac{hAt}{mc} \quad \text{Equation 18}$$

This can further be rearranged into:

$$T = T_{in} + \frac{P_{tot}}{hA} \left(1 - e^{-\frac{hAt}{mc}} \right) \quad \text{Equation 19}$$

This is the final energy balance equation, presented and applied to the data. 

REFERÊNCIAS / REFERENCES

1. Amero, B.A. (1980); *Refining optimization. Single pass disk refiners vs. multiple pass laboratoy beaters*. Int. Symp. of Fundamental Concepts of Refining, Appleton, Wis, USA, Proceedings:179-189
2. Anon. (2000); TAPPI TIP-0508-02: *Glossary of terms used in pulp refining*. 3 pp.
3. Anon. (2006); *Website http://www.engineering-toolbox.com/* Accessed February 2006
4. Atalla, R.H. and Wahren, D. (1980); *On the energy re-quirement in refining*. Tappi J. 1980, 63 (6) 121-
5. Baker, C. (2003); *Refining and improved paper machine runnability*, 7th PIRA International Refining Conference Scientific and Technical Advances in Refining and Mechanical Pulping, Stockholm, Sweden, Mar. 25-26 2003, PIRA, Paper 12
6. Baker, R.M.: *Factors governing the strength development of kraft pulps*. PhD-thesis, Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wis-consin, USA, 1940
7. Basile, F.C. (1984); *Energy considerations in stock preparation*. Tappi J. 1984, 67 (4) :84-88
8. Batchelor, W. and Ouellet, D. (1997); *Estimating forces on fibres in refining*. 4th Pira International Refining Conference, Fiuggi, Italy, Mar. 18-20 1997, PIRA, pp. 45-60
9. Batchelor, W.J., Martinez, M., Kerekes, R.J and Ouellet, D. (1997); *Forces on fibres in low-consistency refining: shear force J. Pulp Paper Sci.* 1997, 23 (1) J40-
10. Batchelor, W., Lundin, T. and Fardim, P. (2006); *A method to estimate fibre trapping in low consistency refining*. Tappi J. 2006, 5 (8) 31-35
11. Bennington, C. P. J. and Kerekes, R.J. (1996); *Power requirements for pulp suspension fluidization*. Tappi J. 1996, 79 (2) 253-
12. Brecht, W. (1967); *A method for comparative evaluation of bar-equipped beating devices*. Tappi J. 1967, 50 (8) 40A-
13. Casey, J.P.; *Pulp and paper chemistry and chemical technology. Vol. II: Papermaking, 2nd Ed.*, 1249 pp. Interscience Publishers Ltd London, 1960
14. Çengel, Y.A. and Boles, M.A.; *Thermodynamics. An Engineering Approach*. McGraw-Hill, New York, 946 pp. 2006
15. Chen, K-F. and Chen, S-M. (1997); *Fluidization properties of high-consistency fiber suspensions*. Experimental Thermal and Fluid Science 1997, 14 (2) 149-
16. Clark, J. d'A.; *Pulp technology and treatment for paper*. 752 pp. Miller Freeman, San Francisco, 1978
17. Cross, C.F. and Bevan, E.J.; *A text-book of paper-making*. E. & F.N. Spon Ltd, London, UK, 1907

18. Dietemann, P. and Roux J-C. (2005); *A study of disc refiner running in n-load condition*. Cellulose Chemistry and Technology 2005, 39 (5-6) 459-
19. Ebeling, K. (1980); *A critical review of current theories for the refining of chemical pulps*, Int. Symp. of Fundamental Concepts of Refining, September 16-18 1980, Appleton, Wisconsin, The Institute of Paper Chemistry
20. Espenmiller, H.P. (1969) *The theory and practice of refining*. Southern Pulp and Paper Manufacturer 1969, 32 (4) 50
21. Giertz, H.W. (1964); *Contribution to the theory of tensile strength*. Atti del congresso Europeo di tecnica cartaria. Venezia, 15-19 Sep. 1964. Eucepa, Gruppo di Studi Europeo TAPPI, Proceedings:39-47
22. Glasl, E. (1976); *Power saving in refining*. Paper Technol. 1976, 17 (5):200-203
23. Gullichsen, J. and Härkönen, E. (1981); *Medium consistency technology. I Fundamental data*. Tappi J. 1981, 64 (6) 69-
24. Hartler, N. and Nyrén, J. (1971); *Influence of pulp type and post-treatment on the compressive force required for collapse*. Special Technical Association Publication, Tappi, 8, 265
25. Hietanen, S.; *The role of fiber flocculation in chemical pulp refining*, PhD-thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 1991
26. Hiltunen, E.; *On the beating of reinforcement pulp*. PhD-thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2003
27. Kraske, D.J. and Koon, C.M. (1956); *Temperature rise as a refining control*. Tappi J. 1956, 39 (11) 829-
28. Kerekes, R.J. and Schell, C.J. (1992); *Characterization of fibre flocculation regimes by a crowding factor*, J. Pulp Paper Sci. 1992, 18 (1) J32-
29. Kerekes, R.J. and Senger, J. (2003); *Characterizing refining action by forces on fibres*. PACWEST Conference, Harrison Hot Springs, BC, Canada, May 7-10, 2003, PAPTAC, Proceedings, Paper 1
30. Kerekes, R.J. Olson, J. A., Heymer, J. and Goosen, D. (2006); *Heterogeneity in pulp refining*. 9th Pira International Refining Conference, February 20-24 2006, Vienna, Austria, PIRA, Proceedings
31. Koskenhely, K.; *Effect of selected fillings parameters on the refining of softwood kraft pulp*. PhD-thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2007
32. Lama, I., Perrier, M. and Stuart, P. (2007); *Determining the inherent potential for specific energy reduction and variability attenuation in TMP-refining operations*. Nord. Pulp Paper Res. J. 2007, 22 (3) 299-
33. Levlin, J.-E. (1988); *Opportunities for energy savings in low-consistency refining*. Investigación y Técnica del Papel 1988, (98) 799-
34. Lewis, J. and Danforth, D. W. (1962); *Stock preparation analysis*. Tappi J. 1962, 45 (3) 185-
35. Lundin, T.; *LC-refining of softwood bleached kraft pulps with special reference to pulp suspension rheology*, LSc-thesis, Åbo Akademi University, Turku, Finland, 2002
36. Lundin, T.; *Tailoring pulp fibre properties in low consistency refining*, DSc-thesis, Åbo Akademi University, Turku, Finland, 2008
37. Lundin, T., Batchelor, W. and Fardim, P. (2008b); *Fibre trapping in low consistency refining: new parameters to describe the process*. Tappi J. 2008, 7 (7) 15-19
38. Matthews, F.L. and Rawlings, R.D.; *Composite materials: engineering and science*. Woodhead Publishing, Cambridge, UK. 470 p. 1999
39. Martinez, M., Batchelor, W.J, Kerekes, R.J. and Ouellet, D. (1997); *Forces on fibres in low-consistency refining: normal force*. J. Pulp Paper Sci. 1997, 23 (1) J11-
40. Milne, S. (1936); *A study of the beater*. Pulp Paper Magazine Canada 1936, 37 (6) 442-
41. Motschman, F.W. (1931); *Practice and control of beating and jordaning*. Paper Trade Journal 1931, 92 (8) 127-
42. Nissan, A.; *Lectures on fiber science in paper. Pulp and Paper Technology Series*. Joint textbook committee of the paper industry. 149 pp, 1977
43. Nordman, L., Levlin, J.-E., Makkonen, T. and Jokisalo, H. (1980); *Conditions in an LC-refiner as observed by physical measurements*. Int. Symp. of Fundamental Concepts of Refining, Sep. 16-18 1980, Appleton, Wisconsin, USA, The Institute of Paper Chemistry, Preprints, 121
44. North, F. and Samuels, H. (1946); *World's Paper Trade Rev.*, Tech. Suppl. 1946, 85, Nov 8
45. Rihs, J. (1995); *Low consistency refining - theory vs practice*. Refining 95: Third International Refining Conference, 20-22 Mar, paper 10, 14pp, Atlanta, GA, USA
46. Siewert, W.H. and H. Selder (1980); *Economic use of energy in pulp refining*. Int. Symp. of Fundamental Concepts of Refining, Appleton, Wis, USA, Proceedings:206-216
47. Smith, S.; *Heltojshøllænderen I og 2: en theoretisk undersøgelse*. PhD-thesis, Polytekniske læreanstalt, Copenhagen, Denmark, 1919
48. Van den Akker, J.A. (1958); *Energy considerations in the beating of pulp*. Fundamentals of Papermaking Fibres, Sep. 1957, Cambridge, UK, Ed. Bolam, F., *Technical Section of the British Paper and Board Makers' Association*, Transactions, 435- 446
49. Wahba, M. (1948); *Moisture relationships of cellulose. I the heat of wetting in water and in certain organic liquids*. J. Phys. Chem. 1948, Vol. 52(7) 1197-
50. Wahba, M. (1950); *Moisture relationships of cellulose. II the heats of wetting of partially saturated viscose rayon and standard cellulose in water*. J. Phys. Chem. 1950, Vol. 54 (8) 1148-
51. Wikström, T.; *Flow and rheology of pulp suspensions at medium consistency*. PhD-thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2002
52. Westman, L. (1984); *Idling losses in the low-consistency refining of chemical pulps*. Svensk Papperstidning 1984, 87 (3) R8-