

Agradecimentos

Um trabalho de investigação nunca é um trabalho solitário, mas sim a confluência do esforço e dedicação de muitos. Passo a citar e a agradecer todos aqueles sem os quais este trabalho nunca chegaria a bom termo.

À Universidade da Beira Interior e em especial ao seu Reitor, o Professor Catedrático M. J. Santos Silva, por me ter criado as condições para elaborar este trabalho.

Ao meu orientador Professor Catedrático Jacques Silvy, pelos sua profunda sabedoria na ciência do papel, a qual nunca parou de me surpreender e suscitar admiração. As suas orientações e conhecimentos ímpares levaram-me a aspirar um novo nível de proficiência nesta área.

Ao meu co-orientador Professor Doutor Rogério Simões, pela dedicação incansável e sobretudo pela amizade que soube nutrir. A sua intervenção nesta tese foi fulcral, desbloqueando todas as barreiras impostas pela implementação física de uma investigação experimental. As horas passadas a discutir os temas desta tese e todos os conhecimentos que me transmitiu incentivaram-me a aprofundar os meus estudos e ganhar uma nova afeição por estes.

Ao Eng.º Espírito Santo, docente da UBI no Departamento de Electromecânica, pela cedência do equipamento por ele implementado e pela paciência no apoio que prestou.

Ao Professor Doutor Pedro Araújo, docente do Departamento de Informática, pelo software que desenvolveu. Apresentou sempre uma prestabilidade difícil de encontrar e uma atenção que não é de esquecer.

A todos os meus colegas do Departamento de Ciência e Tecnologia do Papel, pelo o apoio, compreensão e companheirismo. Não posso deixar de destacar a Eng.^a Cristina Gil, pelas horas incansáveis de apoio laboratorial, pela disponibilidade que sempre revelou e pela amizade demonstrada.

A Thierry Cresson, pelo apoio e disponibilidade para efectuar ensaios no CyberFlex.

Ao Professor J. Bloch e ao Professor J. Roux, pelas suas orientações valiosas e pelo apoio prestado. A Yves Chave, pelo seu apoio na implementação do LVDT.

À minha querida esposa, pela paciência, dedicação e ajuda preciosa. Nos momentos mais necessários soube impulsionar-me e tornar a sua realização numa agradável e até divertida labuta partilhada. Esta tese também é dela.

Aos meus queridos Pais, irmã Ana Maria, cunhado Luís e afilhados Diogo e Diniz, por terem sempre estado ao meu lado.

A todos dirijo-lhes sinceramente a muito beirã expressão que agora adopto:
Bem Hajam!

Sumário

O objectivo desta tese é o estabelecimento de uma metodologia que permita relacionar as propriedades da suspensão fibrosa, nomeadamente as morfológicas e físicas, assim como as do papel, designadamente as estruturais, ópticas e de resistência, com as variáveis operacionais de refinação e as características físicas e químicas da matéria-prima. Visa-se assim efectuar um contributo para a análise da refinabilidade de pastas químicas para papel.

As refinações realizaram-se num refinador Valley laboratorial, tendo-se utilizado como variáveis de estudo a *carga sobre o cilindro*, a *velocidade de rotação do rotor* e a *energia específica aplicada*. Para a sua consecução adaptou-se ao equipamento um variador de velocidade no rotor, um sensor para medição da distância entre o rotor e o estator e um medidor de potência eléctrica.

Estudaram-se estes efeitos para diferentes matérias-primas, tendo-se incluído na análise três pastas Kraft branqueadas, uma de pinho silvestre, uma de eucalipto e outra de bétula. Ao nível da fibra, analisou-se a sua morfologia por análise de imagem, especificamente o seu comprimento médio e a sua distribuição, a sua largura, massa linear, curvatura, teor em dobras, fibrilação e proporção de finos; determinou-se ainda a sua resistência intrínseca, o seu nível de hidratação e a sua flexibilidade em estado húmido. Ao nível do papel analisou-se a massa volúmica das folhas, a resistência à tracção, a resistência ao rebentamento, a resistência ao rasgamento, a brancura, a opacidade e os coeficientes de dispersão e absorção da luz. Implementaram-se metodologias para a medição da área relativa de ligação e para estimar a energia de ligação entre as fibras da folha de papel através de métodos ópticos e mecânicos.

Fez-se igualmente a análise hidromecânica das condições de refinação para estas três matérias-primas. Desta forma estudou-se o efeito das condições de refinação sobre a carga específica de aresta, estimaram-se as forças tangenciais e forças normais desenvolvidas, determinou-se a viscosidade aparente da pasta ao longo da refinação, quantificou-se a distância entre o rotor e o estator (ou seja, o entreferro) e a eficiência energética do processo. Consequentemente, estabeleceu-se uma relação entre a viscosidade aparente da pasta e o valor do entreferro, assim como entre a primeira variável e o gradiente de velocidade.

Os resultados experimentais são explorados de forma a desenvolver relações de controlo das propriedades das pastas para a produção do papel. Foi possível tentar-se uma optimização das condições de refinação para cada uma das matérias-primas estudadas para tipos específicos de papéis industriais, respectivamente em termos das propriedades do papel e do consumo de energia no refinador Valley.

Pode-se concluir que a suspensão de pasta apresenta um comportamento reofluidificante e que a viscosidade aparente da pasta diminui com o progresso da refinação. Observaram-se igualmente diferentes comportamentos reológicos das diversas pastas, o que permite inferir que do ponto de vista de uma análise hidrodinâmica é preferível a refinação de pastas com diferentes características morfológicas em separado.

As equações de ajuste obtidas para as diferentes propriedades estudadas permitem que se comparem as diferentes pastas e que se estude os efeitos das condições operatórias sobre as mesmas. Desta forma, foi possível comprovar que o pinho silvestre exhibe melhores propriedades mecânicas, enquanto que o eucalipto apresenta as melhores propriedades ópticas. No entanto, a bétula supera o eucalipto em termos de desempenho mecânico. Relativamente à análise das condições operatórias, pode-se verificar que a velocidade de rotação tem um efeito preponderante sobre as propriedades da suspensão e do papel. Pode-se ainda aferir que a bétula revela um comportamento inverso do pinho e do eucalipto face à velocidade de rotação e da carga específica de aresta.

Palavras-chave: refinação, refinabilidade, pastas químicas, avaliação de pastas, Valley, hidromecânica, propriedades das fibras, propriedades da pasta, propriedades do papel.

Abstract

The goal of this thesis is to set up a methodology to establish a relationship between pulp properties, namely morphological and physical, and paper properties, specifically structural, optical and strength, with the operating variables of refining and the physical and chemical properties of the raw material. The goal is to contribute to the analysis of the beatability of chemical pulps for paper production.

The beatings took place in a laboratory Valley beater, and the studied variables were the *charge on the roll*, the *rotor speed of rotation* and the *specific applied energy*. For its feasibility, one fitted the following adaptations to the Valley: a rotor speed of rotation variation controller, a sensor to measure the distance between rotor and stator and an electrical power consumption meter.

The effects for three different bleached Kraft pulps were studied, one being pine and the others Portuguese eucalyptus and birch. At the fibre level, its morphology was analysed by image analysis, such as the average fibre length and distribution, its width, coarseness, curl, kinks, fibrillation and fines proportion; the intrinsic fibre resistance was evaluated, such as its water retention value and wet flexibility. At the paper level, one measured its density, tensile strength, burst strength, tear strength, brightness, opacity and its scattering and absorption coefficients. One implemented methodologies to evaluate the relative bonded area and the bond strength in the paper structure using optical and mechanical methods.

The hydromechanics of the beating was analysed for the three pulps. So the beating effects on the specific edge load was studied, the normal and tangential forces were evaluated, the pulp apparent viscosity evolution during refining was determined, the distance between rotor and stator was measured and also the energetic efficiency was quantified. One obtained relationships between the apparent viscosity and the rotor-stator gap, and another between the first one and the rate of shear.

One explored the experimental results in order to develop control relationships for the pulp properties to paper production. One essayed an optimization of the refining conditions for each pulp for specific types of industrial papers, namely in terms of paper properties and the energy consumption in the Valley beater.

The pulp suspension presents rheofluidificant behaviour and the apparent viscosity diminishes along the refining. The different pulps reveal different

rheological behaviour, which leads to the inference that from the hydrodynamical point of view one should treat pulps with different morphological characteristics separately.

The obtained adjustment equations for the different studied properties permit the comparison between the pulps and the study of the effects of the operating conditions. As expected, the pine revealed the best strength performance, the eucalyptus showed the best optical properties, and the birch showed a better mechanical performance relatively to the other hardwood. In what concerns the analysis of the operating conditions, one verified that the rotor speed of rotation has a major influence on the pulp and paper properties. One also inferred that the birch reveals an opposite behaviour comparatively to the pine and the eucalyptus, from the standpoint of the speed of rotation and the specific edge load.

Keywords: beating, refining, beatability, chemical pulps, pulp evaluation, Valley, hydromechanics, fibre properties, pulp properties, paper properties.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
SUMÁRIO.....	III
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DETALHADO	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
INTRODUÇÃO	1
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA REFINAÇÃO	5
2. EQUIPAMENTO E HIDRODINÂMICA.....	29
3. REFINAÇÃO DE PASTAS	51
4. ANÁLISE HIDROMECAÂNICA DO REFINADOR.....	75
5. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA PASTA.....	99
6. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO PAPEL	127
7. AVALIAÇÃO E OPTIMIZAÇÃO	161
CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	183
BIBLIOGRAFIA	189
ANEXO 1 – DETERMINAÇÃO DA ÁREA SOBREPOSTA ROTOR-ESTATOR.....	199
ANEXO 2 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO.....	201
ANEXO 3 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO REFINADOR	202
ANEXO 4 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO LVDT.....	205
ANEXO 5 – CURVAS DE AJUSTE DA EVOLUÇÃO DO LVDT.....	207
ANEXO 6 – ANÁLISE DE CONFIANÇA AO MORFI.....	209
ANEXO 7 – ANÁLISE DE CONFIANÇA AO CYBERFLEX	211
ANEXO 8 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE AJUSTE.....	213

Índice Detalhado

AGRADECIMENTOS	I
SUMÁRIO.....	III
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DETALHADO	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
INTRODUÇÃO	1
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA REFINAÇÃO.....	5
1.1. Conceitos básicos da refinação	5
1.2. Efeitos da refinação	11
1.3. Mecanismo da refinação	17
1.4. Tendências actuais.....	26
2. EQUIPAMENTO E HIDRODINÂMICA.....	29
2.1. Descrição da instalação e calibração dos equipamentos.....	29
2.1.1. Adaptação e calibração do refinador Valley	30
2.1.2. Medição do consumo energético.....	34
2.1.3. Medição do entreferro	42
2.2. Descrição hidromecânica da refinação	45
2.2.1. Cálculo da Energia Específica de Refinação e do SEL.....	45
2.2.2. Cálculo das forças e das tensões médias	46
2.2.3. Cálculo da viscosidade aparente da pasta.....	48
2.2.4. Cálculo do número de Reynolds.	49
3. REFINAÇÃO DE PASTAS	51
3.1. Apresentação das matérias-primas	51
3.2. Medição das propriedades morfológicas das fibras.....	54
3.3. Medição da flexibilidade das fibras.....	59
3.4. Plano de Experiências.....	62
3.4.1. Metodologia e ensaios	62
3.4.2. Plano de Experiências do Pinho	67
3.4.3. Plano de Experiências do Eucalipto	69
3.4.4. Plano de Experiências da Bétula	71
4. ANÁLISE HIDROMECÂNICA DO REFINADOR	75
4.1. Tensões normais e tangenciais	75
4.2. Entreferro	79
4.3. Viscosidade aparente	85
4.4. Relação entre a viscosidade aparente da pasta e o entreferro	87

4.5.	Eficiência Energética.....	92
4.6.	Conclusões sobre o comportamento hidromecânico das pastas.....	97
5.	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA PASTA.....	99
5.1.	Grau de refinação SR e drenabilidade DT.....	99
5.2.	Grau de hidratação.....	105
5.3.	Comprimento da fibra.....	108
5.4.	Resistência da fibra.....	111
5.5.	Flexibilidade da fibra.....	113
5.6.	Teor em microfibrilas.....	116
5.7.	Taxa de finos.....	119
5.8.	Análise global e conclusões sobre as propriedades das pastas.....	122
6.	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO PAPEL.....	127
6.1.	Massa volúmica.....	127
6.2.	Resistência à tracção.....	130
6.3.	Índice de rebentamento.....	133
6.4.	Índice de rasgamento.....	135
6.5.	Brancura e Opacidade.....	138
6.6.	Coefficiente de dispersão e coeficiente de absorção da luz.....	144
6.7.	Área e energia de ligação.....	150
6.8.	Análise global e conclusões sobre as propriedades do papel.....	157
7.	AVALIAÇÃO E OPTIMIZAÇÃO.....	161
7.1.	Escolha da matéria-prima.....	161
7.2.	Análise das condições de refinação.....	165
7.3.	Optimização conjugada de propriedades.....	174
7.4.	Tipos de papel.....	177
7.4.1.	Papel multi-camadas para sacos.....	177
7.4.2.	Papel de escrita (caderno).....	178
7.4.3.	Papel de impressão antes da <i>size-press</i>	179
7.5.	Conclusões da avaliação do potencial das pastas papeleiras.....	180
	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	183
	BIBLIOGRAFIA.....	189
	ANEXO 1 – DETERMINAÇÃO DA ÁREA SOBREPOSTA ROTOR-ESTATOR.....	199
	ANEXO 2 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO.....	201
	ANEXO 3 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO REFINADOR.....	202
	ANEXO 4 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO LVDT.....	205
	ANEXO 5 – CURVAS DE AJUSTE DA EVOLUÇÃO DO LVDT.....	207
	ANEXO 6 – ANÁLISE DE CONFIANÇA AO MORFI.....	209
	ANEXO 7 – ANÁLISE DE CONFIANÇA AO CYBERFLEX.....	211
	ANEXO 8 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE AJUSTE.....	213

Índice de figuras

Figura 1-1 Refinadores: (a) Valley; (b) Discos; (c) Jordan; (d) Claflin (Fonte: Reeves, 1994)	7
Figura 1-2 Mecanismo de refinação (Fonte: Paulapuro 2000)	8
Figura 1-3 Estrutura parede celular da fibra (traqueído de conífera)	14
Figura 1-4 Alguns efeitos da refinação (Fonte: Stevens, 1992).....	16
Figura 1-5 Diagramas de forças e pressões (Fonte: Goncharov, 1971)	24
Figura 1-6 Forças exercidas no floco de acordo com Martinez (Fonte: Kerekes1996).	25
Figura 1-7 Relação entre a força normal e a força tangencial sobre o estator e a posição na barra (Fonte: Batchelor e Ouellet, 1997).	26
Figura 2-1 Refinador Valley laboratorial e desintegrador.....	29
Figura 2-2 Esquemática do refinador Valley (Fonte: Norma Tappi T200 sp-96, 1996)	30
Figura 2-3 Fluxo de pasta no refinador Valley (Fonte: Valley Beater Operating Instructions, 1985)	31
Figura 2-4 Estator do refinador Valley.....	31
Figura 2-5 Fotografia das lâminas do rotor.	33
Figura 2-6 Dispositivo MDGE (Fonte: Espírito Santo, 2001).....	35
Figura 2-7 Transdutor LVDT.....	43
Figura 2-8 Forças exercidas no entreferro.	47
Figura 3-1 Componentes do Analisador Morfi (Fonte: TechPap).	54
Figura 3-2 A fibra como uma viga elástica (Fonte: Steadman e Luner, 1985).....	60
Figura 3-3 Condições de Refinação.	63
Figura 6-1 Modelo da teoria de Kubelka-Munk (Leskela, 1998).	145
Figura 0-1 Esquemas das lâminas do estator (a) e do rotor (b).....	200
Figura 0-2 Análise do desgaste das lâminas.	206

Índice de tabelas

Tabela 1-1 Variáveis processuais (Fonte: Fox, 1980; Ebeling, 1980)	11
Tabela 1-2 Efeitos primários da refinação (Fonte: Ebeling, 1980).....	12
Tabela 1-3 Hipóteses para mecanismos de refinação.....	18
Tabela 2-1 Potência consumida na circulação de pasta (pinho silvestre).....	39
Tabela 2-2 Potência total consumida na refinação (pinho silvestre).....	39
Tabela 2-3 Potência líquida consumida na refinação (pinho silvestre).....	39
Tabela 2-4 Potência consumida na circulação de pasta (eucalipto).....	40
Tabela 2-5 Potência total consumida na refinação (eucalipto).....	40
Tabela 2-6 Potência líquida consumida na refinação (eucalipto).....	41
Tabela 2-7 Potência consumida na circulação de pasta (bétula).....	41
Tabela 2-8 Potência total consumida na refinação (bétula).....	41
Tabela 2-9 Potência líquida consumida na refinação (bétula).....	42
Tabela 3-1 Propriedades morfológicas das fibras das pastas em estudo.....	51
Tabela 3-2 Análise de confiança às propriedades morfológicas.....	59
Tabela 3-3 Valores de calibração do Morfi.....	59
Tabela 3-4 Graus de refinação objectivo e tempos de refinação padrão do Pinho.....	68
Tabela 3-5 Níveis de energia específica de refinação e tempos de refinação nas diferentes condições para o Pinho.....	68
Tabela 3-6 Graus de refinação objectivo e tempos de refinação padrão do Eucalipto.....	70
Tabela 3-7 Níveis de energia específica de refinação e tempos de refinação nas diferentes condições para o Eucalipto.....	70
Tabela 3-8 Graus de refinação objectivo e tempos de refinação padrão da Bétula.....	72
Tabela 3-9 Níveis de energia específica de refinação e tempos de refinação nas diferentes condições para a Bétula.....	72
Tabela 7-1 Variáveis para análise comparativa entre matérias-primas no ponto central.....	164
Tabela 7-2 Variáveis de análise do pinho.....	171
Tabela 7-3 Variáveis de análise do eucalipto.....	172
Tabela 7-4 Variáveis de análise da bétula.....	173
Tabela 7-5 Valores padrão e objectivo para o papel multi-camadas para saco.....	177
Tabela 7-6 Valores do processo de optimização para o papel multi-camadas para saco.....	178
Tabela 7-7 Valores padrão e objectivo para o papel de escrita para caderno.....	178
Tabela 7-8 Valores do processo de optimização para o papel de escrita para caderno.....	179
Tabela 7-9 Valores padrão e objectivo para o papel de impressão.....	180
Tabela 7-10 Valores do processo de optimização para o papel de impressão.....	180
Tabela 0-1 Análise de confiança às propriedades morfológicas do pinho silvestre medidas no Morfi.....	209
Tabela 0-2 Análise de confiança às propriedades morfológicas do eucalipto medidas no Morfi.....	209
Tabela 0-3 Análise de confiança às propriedades morfológicas da bétula medidas no Morfi.....	210
Tabela 0-4 Análise de confiança ao Cyberflex.....	211

Índice de gráficos

Gráfico 2-1 Ensaio de medição de potência para o pinho silvestre.	37
Gráfico 2-2 Ensaio de medição de potência para o eucalipto.	37
Gráfico 2-3 Ensaio de medição de potência para a bétula.	38
Gráficos 2-4 Entreferro antes e nos minutos iniciais da refinação.	44
Gráfico 3-1 Curva de refinação padrão do pinho silvestre.	53
Gráfico 3-2 Curva de refinação padrão do eucalipto.	53
Gráfico 3-3 Curva de refinação padrão da bétula.	53
Gráfico 3-4 Potência Líquida do Pinho.	67
Gráfico 3-5 Carga Específica de Aresta do Pinho	69
Gráfico 3-6 Potência Líquida do Eucalipto	69
Gráfico 3-7 Carga Específica de Aresta do Eucalipto.	71
Gráfico 3-8 Potência Líquida da Bétula	71
Gráfico 3-9 Carga Específica de Aresta da Bétula.	73
Gráfico 4-1 Tensão normal no entreferro.	75
Gráficos 4-2 Tensão tangencial no entreferro.	76
Gráficos 4-3 Coeficiente de fricção no entreferro.	78
Gráfico 4-4 Evolução real do entreferro em função do tempo nas condições padrão.	79
Gráficos 4-5 Valor do entreferro no início da refinação (mm).	80
Gráficos 4-6 Evolução do entreferro (-10^{-4} mm/min).	81
Gráfico 4-7 $G(s^{-1})$ em função da energia específica de refinação no ponto central.	83
Gráficos 4-8 Gradiente de velocidade no entreferro no nível E_2	84
Gráfico 4-9 Viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) em função da energia específica de refinação no ponto central.	85
Gráficos 4-10 Viscosidade aparente das suspensões (nível de energia E_2).	86
Gráfico 4-11 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e G (s^{-1}) no entreferro.	88
Gráfico 4-12 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro (μm) a 400rpm.	89
Gráfico 4-13 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro (μm) a 500rpm.	90
Gráfico 4-14 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro (μm) a 600rpm.	90
Gráficos 4-15 Rendimento energético do refinador Valley (%).	94
Gráfico 4-16 Relação entre $\eta(\%)$ e $e(mm)$ a 400rpm.	95
Gráfico 4-17 Relação entre $\eta(\%)$ e $e(mm)$ a 500RPM.	95
Gráfico 4-18 Relação entre $\eta(\%)$ e $e(mm)$ a 600rpm.	95
Gráfico 4-19 Relação entre $\eta(\%)$ e μ_{ap} (Pa.s) a 400rpm.	96
Gráfico 4-20 Relação entre $\eta(\%)$ e μ_{ap} (Pa.s) a 500rpm.	96
Gráfico 4-21 Relação entre $\eta(\%)$ e μ_{ap} (Pa.s) a 600rpm.	96
Gráfico 5-1 Grau de refinação em função da energia específica de refinação no ponto central.	99
Gráficos 5-2 Grau de Refinação em $^{\circ}SR$, no nível de energia E_2	101
Gráfico 5-3 Tempo de drenagem em função da energia específica de refinação no ponto central.	102
Gráficos 5-4 Tempo de Drenagem (s) no nível de energia E_2	104
Gráfico 5-5 $WRV_{IntraFibra}$ em função da energia específica de refinação no ponto central.	106
Gráficos 5-6 Grau de Hidratação WRV (%) no nível de energia E_2	107

Gráfico 5-7 Comprimento aritmético da fibra em função energia específica de refinação no ponto central.	109
Gráficos 5-8 Comprimento aritmético da fibra (mm) no nível de energia E ₂	110
Gráfico 5-9 <i>Zero-span Tensile</i> da fibra em função da energia específica de refinação no ponto central.	112
Gráfico 5-10 Índice de flexibilidade da fibra em função da energia específica de refinação no ponto central.	113
Gráficos 5-11 Índice de Flexibilidade da fibra no nível de energia E ₂	115
Gráfico 5-12 Teor em macrofibrilas na fibra em função da energia específica de refinação no ponto central.	116
Gráficos 5-13 Teor em Macrofibrilas no nível de energia E ₂	118
Gráfico 5-14 Taxa de finos P200 do Bauer-McNett em função da energia específica de refinação no ponto central.	120
Gráficos 5-15 Taxa de Finos P200 do Bauer-McNett (%) no nível de energia E ₃	121
Gráfico 6-1 Massa volúmica do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.	127
Gráficos 6-2 Massa Volúmica (kg/m ³) no nível de energia E ₂	129
Gráfico 6-3 Índice de tracção do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.	130
Gráficos 6-4 Índice de Tracção (N.m/g) no nível de energia E ₂	132
Gráfico 6-5 Índice de rebentamento do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.	133
Gráficos 6-6 Índice de Rebentamento (kPa.m ² /g) no nível de energia E ₂	134
Gráfico 6-7 Índice de rasgamento do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.	136
Gráficos 6-8 Índice de Rasgamento (N.m ² /Kg) no nível de energia E ₂	137
Gráfico 6-9 Brancura do papel (%) em função da energia específica de refinação no ponto central.	139
Gráficos 6-10 Brancura (%) no nível de energia E ₂	140
Gráfico 6-11 Opacidade do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.	142
Gráficos 6-12 Opacidade ISO (%) no nível de energia E ₂	143
Gráfico 6-13 Coeficiente de dispersão da luz em função da energia específica de refinação no ponto central.	146
Gráficos 6-14 Coeficiente de Dispersão da Luz (m ² /kg) no nível de energia E ₂	147
Gráfico 6-15 Coeficiente de absorção da luz em função da energia específica de refinação no ponto central.	148
Gráficos 6-16 Coeficiente de Absorção da Luz (m ² /kg) no nível de energia E ₃	149
Gráfico 6-17 Área relativa de ligação (RBA) em função da energia específica de refinação no ponto central.	151
Gráficos 6-18 Área Relativa de Ligação (RBA) no nível de energia E ₂	153
Gráfico 6-19 Energia da ligação Nordman em função da energia específica de refinação no ponto central.	155
Gráficos 6-20 Energia da Ligação Nordman (kJ/m ²) no nível de energia E ₂	156
Gráfico 7-1 Relação entre o índice de rasgamento e o índice de tracção do pinho nas diferentes condições de refinação.	174
Gráfico 7-2 Relação entre o índice de rasgamento e o índice de tracção do eucalipto nas diferentes condições de refinação.	175

Gráfico 7-3 Relação entre o índice de rasgamento e o índice de tracção da bétula nas diferentes condições de refinação.....	176
Gráfico 0-1 Velocidade de rotação do rotor (rpm) do Valley em função da frequência de alimentação do motor (Hz).	201
Gráfico 0-2 Curva de refinação da pasta padrão de resinosa.....	202
Gráfico 0-3 Curva de refinação da pasta de pinho silvestre (em estudo).....	203
Gráfico 0-4 Curva de refinação da pasta padrão de eucalipto.	203
Gráfico 0-5 Curva de refinação da pasta de eucalipto (em estudo).	204
Gráfico 0-6 Curva de refinação da pasta de bétula (em estudo).	204
Gráfico 0-7 Curvas de Calibração do LVDT (Data: 2005.05.12).....	205
Gráfico 0-8 Linha de ajuste do entreferro do pinho silvestre nas condições padrão.	207
Gráfico 0-9 Linha de ajuste do entreferro do eucalipto nas condições padrão.....	208
Gráfico 0-10 Linha de ajuste do entreferro da bétula nas condições padrão.....	208

Lista de Símbolos

A_c	Área de contacto rotor – estator	[m ²]
A_f	Área de fluxo do fluido	[m ²]
BI	Índice de Rebentamento	[kPa.m ² .g ⁻¹]
BR	Brancura	[%]
CV	Coefficiente de variação	[%]
CF	Factor de conformabilidade	[N.m ² .g ⁻¹]
DT	Tempo de Drenagem TAPPI	[s]
d_h	Diâmetro hidráulico	[m]
ds	Comprimento do arco	[m]
dw	Trabalho diferencial	[J]
e	Entreferro	[mm]
EER	Energia específica de refinação	[kWh/t]
E_i	Nível de energia	[kWh/t]
EL	Energia da ligação Nordman	[kJ.m ⁻²]
ETR	Energia total de refinação	[kWh/t]
F_n	Força normal	[N]
F_t	Força tangencial	[N]
f	Coefficiente de fricção	[—]
G	Gradiente de velocidade	[s ⁻¹]
g	Aceleração da gravidade	[m.s ⁻²]
GR	Grau de refinação	[°SR]
IF	Índice de flexibilidade	[—]
IR	Índice de rasgamento	[N.m ² .kg ⁻¹]
IT	Índice de tracção	[N.m.g ⁻¹]
K	Índice de consistência	[—]
L	Carga normalizada	[—]
l	Comprimento das barras do estator e do rotor	[m]
L_a	Comprimento aritmético da fibra	[mm]

LC	limites de confiança	[—]
lf	Comprimento médio da fibra	[mm]
L_{pl}	Comprimento ponderado em comprimento	[mm]
L_s	Velocidade de corte	[m.s ⁻¹]
m	Massa colocada na alavanca	[kg]
m_f	Massa seca da fibra	[kg]
MF	Teor em macrofibrilas	[%]
MV	Massa Volúmica	[kg.m ⁻³]
\dot{N}	Velocidade de rotação do rotor	[s ⁻¹]
N	Velocidade de rotação normalizada	[—]
O	Ponto central	[—]
OP	Opacidade	[%]
P_i^j	Valor da propriedade i na origem	[—]
P_a	Pressão de prensagem	[Pa]
P_i	Propriedade i	[—]
P_L	Potência líquida da refinação	[W.kg ⁻¹]
P_L	Potência líquida consumida	[W]
P_m	Perímetro molhado da conduta	[m]
P_r	Pressão específica na aresta	[N.m ⁻¹]
P_t	Potência total consumida	[W]
P_v	Potência consumida em vazio	[W]
r	Raio do rotor	[m]
RBA	Área relativa de ligação	[—]
Re	Número de Reynolds	[—]
S	Rigidez da fibra	[N.m ²]
S	Coefficiente de dispersão	[m ² .kg ⁻¹]
K	Coefficiente de absorção	[m ² .kg ⁻¹]
SEL	Carga específica de aresta	[J.m ⁻¹]
t	Tempo de refinação	[s]

TF	Teor de Finos	[%]
v	Velocidade do fluido	[m.s ⁻¹]
\bar{v}	Velocidade no rotor	[m.s ⁻¹]
VA	Variância amostral	[—]
W	Largura projectada da fibra	[μ m]
WFF	Flexibilidade em estado húmido	[N ⁻¹ .m ⁻²]
WRV	Percentagem de humidade retida pelas fibras	[%]
WRV _{Intrafibra}	Fracção da água retida no interior da fibra	[%]
WRV _{Extrafibra}	Fracção de água retida no exterior da fibra	[%]
Z_r	Número de barras do rotor	[—]
Z_s	Número de barras do estator	[—]
ZS	Zero-Span em Húmido	[N.cm ⁻¹]

Letras Gregas

α_i^j	Coefficiente linear de N	[—]
$d\alpha$	Ângulo diferencial	[rad]
β_i^j	Coefficiente linear de L	[—]
δ_u^j	Parâmetro de interacção	[—]
Δv_e	Diferencial de velocidade	[m.s ⁻¹]
η	Eficiência energética	[%]
μ	Viscosidade	[Pa.s]
$\mu_{\text{Água}}$	Viscosidade da água	[Pa.s]
μ_{ap}	Viscosidade aparente	[Pa.s]
ρ	Massa volúmica	[kg.m ⁻³]
τ_n	Tensão normal média	[kPa]
τ_t	Tensão tangencial média	[kPa]
Ψ	Carga da refinação	[kg]
Ω	Velocidade de rotação do rotor	[rpm]

Introdução

A indústria da pasta e papel em Portugal ocupa um lugar de destaque no panorama industrial português. Representou em 2003 um volume de vendas de 1,4 mil milhões de euros, trata-se de um sector exportador líquido, emprega directa e indirectamente uma fatia muito significativa da população activa do país e valoriza um recurso natural e renovável que é a madeira. Apesar da sua importância estratégica para a economia nacional e de competir à escala mundial, só recentemente é que o sector da pasta e do papel tem vindo a receber a atenção que merece por parte das instituições de investigação nacionais.

A avaliação da aptidão da matéria-prima, a madeira ou pasta, respectivamente para a produção de pasta ou papel é uma das áreas de investigação que tem merecido a atenção da comunidade científica nacional. O presente estudo insere-se nas vertentes da avaliação do potencial das diferentes pastas para papel e no estudo da operação de refinação. Considerando as matérias-primas usadas pela indústria nacional na produção de papel, particularmente de impressão e escrita, optou-se por estudar uma pasta química de fibra longa e duas fibras curtas com características nitidamente diferentes, o eucalipto nacional e a bétula.

No que respeita ao potencial papeleiro das pastas, este tem sido maioritariamente sido realizados em equipamentos à escala laboratorial, ocupando o refinador PFI um lugar de destaque. Neste tipo de equipamento as condições de operação são facilmente controladas, a quantidade de pasta requerida é pequena, sendo por isso possível obter muita informação com um esforço laboratorial aceitável. Porém, as condições de refinação standard deste equipamento estão longe de reproduzir as condições que as fibras experimentam num refinador industrial.

Os refinadores piloto aproximam-se bastante mais das condições industriais, mas as elevadas quantidades de pasta requeridas e a dificuldade de controlar efectivamente algumas condições de operação e a disponibilidade do equipamento conduzem a que a sua utilização seja relativamente limitada, embora desejável.

No presente trabalho optou-se por utilizar o refinador Valley, efectuando-lhe alterações que permitiram variar a velocidade do rotor e a carga de refinação enquanto se monitorizava a distância rotor-estator e o consumo de energia. Estas modificações visaram permitir o estudo das condições de operação sobre o desenvolvimento das

características das fibras e do correspondente papel. Utilizando uma quantidade de pasta moderada e sob condições experimentais bem controladas, foi possível estudar a influência dos parâmetros operacionais sobre as variáveis hidromecânicas envolvidas, as propriedades das fibras, da suspensão de pasta e as características do papel.

A relação entre as variáveis de controlo que serviu de base ao plano de experiências seguido está representada na Tabela 0.

Esta tese está estruturada em sete capítulos e oito apêndices.

Passando-se a descrever o conteúdo desta tese, no capítulo um realiza-se uma revisão bibliográfica relativa aos conceitos básicos da refinação, da análise dos seus efeitos e do seu mecanismo básico.

No capítulo dois faz-se a apresentação do refinador Valley, a descrição das suas características e da metodologia de calibração do equipamento. Descreve-se igualmente o medidor de potência eléctrica consumida e o sistema criado para a medição do entreferro. Faz-se aqui também a apresentação dos conceitos teóricos relativos à hidromecânica do refinador Valley, sendo um exemplo o cálculo das tensões exercidas e da viscosidade aparente da pasta. Faz-se igualmente a estimativa do número de Reynolds para suportar teoricamente a existência de um escoamento laminar no entreferro.

No capítulo três realiza-se a apresentação das matérias-primas e das metodologias desenvolvidas para acompanhar a evolução das suas características. Apresentam-se assim o medidor das propriedades morfológicas por análise de imagem e o medidor da flexibilidade em húmido. Descreve-se finalmente o plano de experiências desenvolvido para cada matéria-prima.

No capítulo quatro efectua-se a análise hidromecânica do refinador para cada uma das matérias-primas. Calculam-se os valores médios das tensões normais e tangenciais, a evolução do entreferro e da viscosidade. Estabelece-se ainda a relação entre a viscosidade aparente e o gradiente de velocidade e ainda entre a viscosidade aparente e o entreferro. Finalmente estabelece-se uma fórmula global para estimar a tensão tangencial exercida no entreferro como função do entreferro e a da velocidade de rotação do rotor. Estuda-se igualmente a relação entre o rendimento energético do Valley como função das condições de refinação e da matéria-prima. Ensaia-se finalmente a obtenção de uma fórmula global relacionando o rendimento energético

com o valor do entreferro e a velocidade de rotação do rotor; foi ainda possível generalizar a fórmula relacionando aquela variável agora com a viscosidade aparente e a velocidade de rotação do rotor.

No capítulo cinco faz-se a análise das propriedades da pasta e das fibras, estabelecendo-se fórmulas globais que as relacionavam com a energia específica de refinação e as respectivas condições de operação do refinador.

No capítulo seis efectua-se a análise das propriedades da ligação entre as fibras e das propriedades do papel, estabelecendo-se tal como no capítulo anterior fórmulas globais para estas propriedades em função da energia específica de refinação e das variáveis de operação.

No capítulo sete realiza-se inicialmente uma análise comparativa das pastas estudadas; faz-se então uma compilação das condições de operação mais adequadas tendo em conta os objectivos pretendidos. Finalmente efectua-se a optimização do ponto de vista energético e das propriedades do papel para a obtenção de tipos específicos de papéis industriais, utilizando-se as fórmulas desenvolvidas nos capítulos anteriores.

Finaliza-se com a súmula das conclusões mais relevantes desta tese e apresentam-se as perspectivas futuras de prosseguimento das linhas de investigação aqui iniciadas.

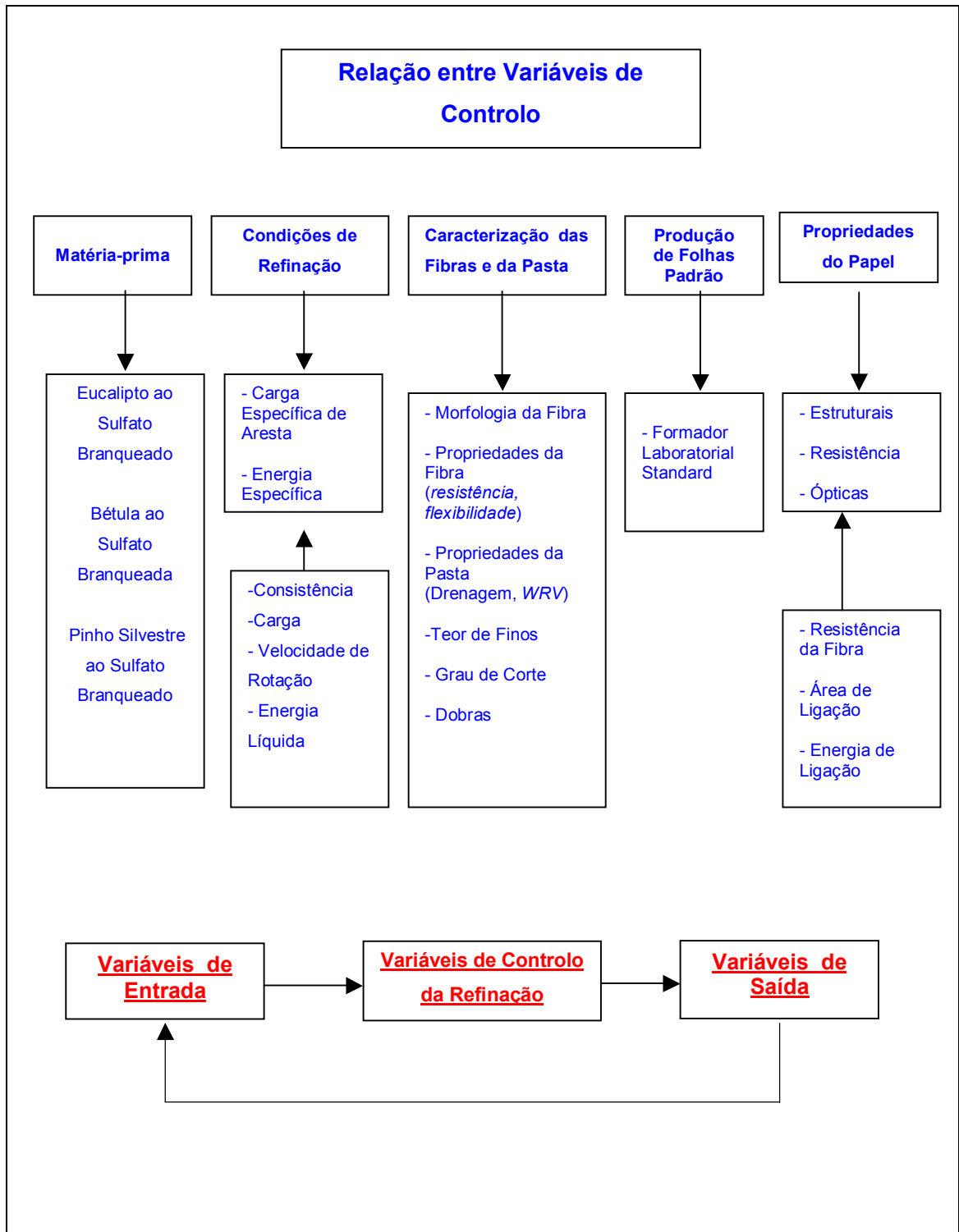


Tabela 0 – Relação entre variáveis de controle.

1. Revisão Bibliográfica da Refinação

1.1. *Conceitos básicos da refinação*

Definição e objectivos da refinação

É um velho lema do técnico papelero que “o papel é feito no refinador”. Esta divisa dá ênfase à importância que esta operação exerce na fabricação do papel. A refinação é de facto o processo unitário que tem um mais profundo efeito no papel a ser formado (Helle, 1989).

Mas em que é que consiste esta operação tão crucial na indústria do papel?

Ebeling (1980) define-a como sendo “o processo de se criarem modificações estruturais desejáveis na parede celular das fibras da pasta através da aplicação de energia mecânica”. Estas modificações visam obter as características estruturais desejáveis para se obter um papel ou cartão com propriedades e comportamentos específicos. A natureza e a extensão das modificações estruturais desejáveis dependem muito das propriedades de utilização final requeridas pelo tipo de papel em questão e das qualidades papeleras das fibras da pasta não refinada.

Infelizmente, os processos actuais de refinação criam simultaneamente nas fibras modificações estruturais indesejáveis. Assim, a refinação exige que um compromisso deve ser estabelecido entre os efeitos desejados e possíveis de obter nas fibras da pasta e as características pretendidas para a folha de papel.

Notável é ainda a diversidade de combinações das várias propriedades do papel que podem ser obtidas com diferentes tratamentos da fibra, permitindo a produção de produtos papeleros com diversas aplicações. O número de diferentes tipos de papéis já foi avaliado em várias centenas (Emerton, 1980). Este pode ser rugoso ou liso, à prova de gordura ou à prova de água, absorvente ou não, suave como o algodão ou áspero como uma tábua, à prova de calor, até à prova de fogo, resistente aos produtos químicos, opaco ou transparente, branco ou colorido, brilhante ou baço, resistente ou frágil, denso ou poroso, rígido ou flexível.

Os objectivos da refinação podem variar consideravelmente, e em consequência as condições de refinação, dependendo da pasta utilizada e do tipo de papel em questão. Estes abarcam os seguintes pontos (Helle, 1989):

1. Fornecer ao papel a resistência mecânica exigida pelo papel em causa.
2. Melhorar a uniformidade e a formação da folha.
3. Reduzir a opacidade do papel, ou então limitar a sua diminuição, consoante o tipo de papel pretendido.

Princípio básico e evolução tecnológica

O princípio de todo o equipamento de refinação, desde a invenção do pilão holandês no século XVII, assenta no tratamento das fibras entre barras estacionárias e barras móveis sob pressão na presença de água (Ebeling, 1980; Lumiainen, 2000). As guarnições¹ são providas de ranhuras de modo a que as barras que tratam as fibras e as ranhuras entre barras permitam o transporte das fibras através da máquina.

Como uma evolução tecnológica baseada no mesmo princípio, surgiu em 1858 o refinador cónico, patenteado por Joseph Jordan e Thomas Eustenice (Clark, 1985; Stevens, 1992). Apesar de o primeiro refinador de discos ter sido construído em 1856 por T. Kingsland, as dificuldades de concepção e construção levaram à sua generalização apenas no final da década de 1950. Actualmente os refinadores de discos duplos têm um papel dominante nas fábricas de papel. Na Figura 1-1 pode observar-se os esquemas de funcionamento do refinador Valley, similar ao pilão holandês, do refinador de discos e do refinador cónico.

Outros métodos alternativos têm sido investigados, nomeadamente a refinação por ultra-sons (Young, 1980, p.854), a refinação coadjuvada quimicamente (Milichovsky, 1990) e a refinação biológica (Seo, Shin e Jeon, 2000). Porém, a sua implementação industrial está ainda por conseguir.

Refinação de pastas químicas a baixa consistência

Os processos de refinação aqui estudados abarcam apenas a refinação de pastas químicas por métodos mecânicos a baixa consistência. As pastas químicas são aquelas em que as fibras constituintes resultam da dissolução da lenhina por métodos químicos (Smook, 1982). Considera-se que uma pasta está a baixa consistência quando esta é inferior a 6% (Lavigne, 1986).

¹ Guarnição é a estrutura contendo as lâminas do rotor ou do estator.

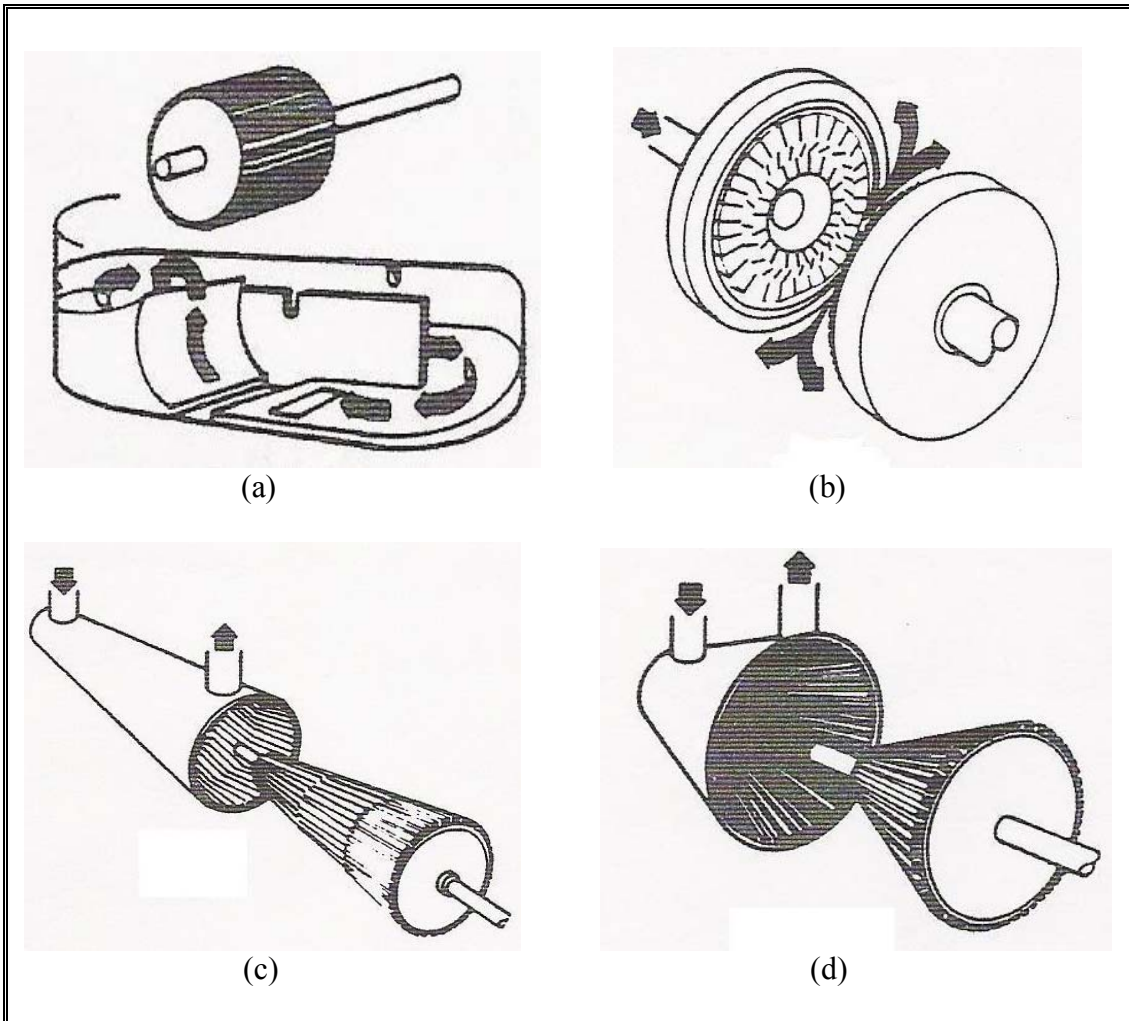


Figura 1-1 Refinadores: (a) Valley; (b) Discos; (c) Jordan; (d) Claffin (Fonte: Reeves, 1994)

Na refinação a baixa consistência as fibras estão presentes na forma de flocos. O mecanismo de refinação que é actualmente aceite está representado na Figura 1-2 e compreende as seguintes fases:

1. Recolha das fibras na aresta frontal da barra.
2. Compressão do floco e impacto. A maior parte da água é expelida do floco. As fibras mais curtas são expelidas para as cavidades.
3. Deslizamento da lâmina ao longo do floco, comprimindo-o contra a superfície lisa do estator. Todo este processo corresponde a um impacto no floco; a duração do impacto é função da espessura da barra, do seu ângulo de intersecção e da velocidade relativa rotor – estator.

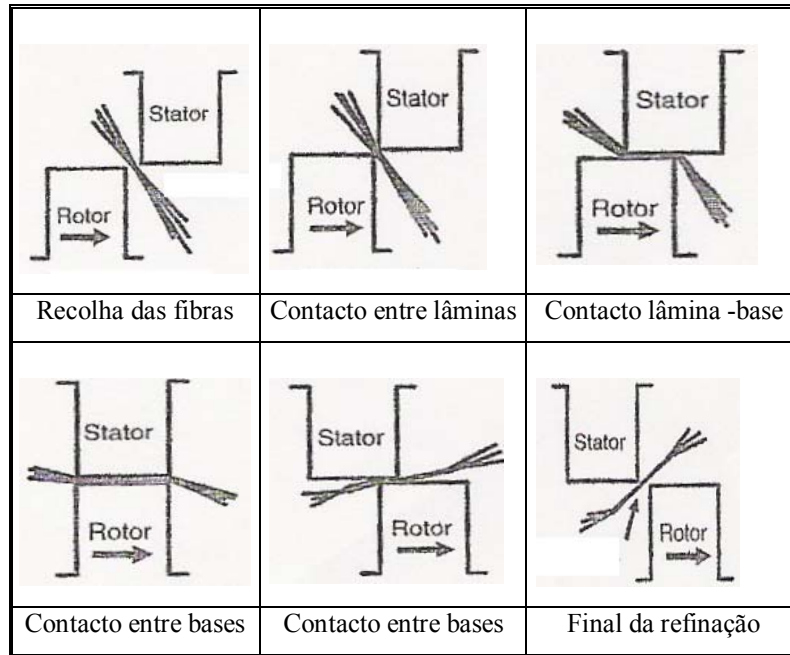


Figura 1-2 Mecanismo de refinação (Fonte: Paulapuro 2000)

Entreferro e a capacidade de sustentação de carga

Dois conceitos fulcrais na refinação são o conceito de entreferro e o conceito de capacidade de sustentação da carga.

Pode definir-se entreferro como a distância que separa a superfície da barra do rotor e a superfície da barra do estator. Para uma refinação tecnicamente aceitável, a distância entre as superfícies das barras tem que ser suficientemente pequena, ou seja, da ordem de alguns diâmetros de fibras. Na refinação de baixa consistência, o entreferro médio é de cerca de 100 μm . O entreferro depende da natureza das fibras, resinosas ou folhosas, e corresponde à espessura de 2-5 fibras inchadas ou 10-20 fibras após colapso.

Um filme de água dificilmente suporta uma carga compressiva exercida sobre o filme entre as superfícies estacionárias e móveis². Uma suspensão fibrosa por sua vez tem a capacidade de contrariar a pressão exercida pelas barras do rotor, gerando um entreferro. Esta resposta define o conceito de capacidade de sustentação de carga.

A capacidade de sustentação de carga e de formar um entreferro depende do tipo de fibra, da carga do refinador, da velocidade de rotação, do fluxo hidrodinâmico,

² Quando se esquia sobre a neve ou um veículo sofre aquaplanagem na estrada, existe de facto uma película de água sob o esqui ou pneu. Existem anteparos em turbinas que suportam cargas elevadas; este facto resulta da viscosidade da água.

da pressão hidráulica, da direcção de rotação, da consistência e da quantidade de refinação já sofrida pelas fibras.

Os resultados da refinação são significativamente afectados pelo material das barras e pelo grau de desgaste das arestas (arredondadas ou afiadas). É bem conhecido o quão crítico é a condição e o método de acondicionamento das barras do refinador industrial e do refinador laboratorial Valley para o resultado da refinação.

Papel da água

Não pode deixar de ser salientado o papel fulcral da água na refinação. A água actua como um agente plastificante e meio protector no processo de refinação. Pode-se afirmar que o principal efeito da refinação é a abertura da estrutura da fibra na presença de água. As alterações fundamentais na estrutura da fibra, tais como a fibrilação externa, a fibrilação interna e a hidratação da celulose não seriam possíveis na ausência de água. Não é assim possível refinar uma pasta celulósica num líquido não polar.

Variáveis processuais

O papelero tem diversas variáveis processuais disponíveis que afectam o processo de refinação. Podemos identificar os seguintes grupos de variáveis (ver a Tabela 1-1):

1. Variáveis relativas à matéria-prima (tipo de fibra, tipo de cozimento, rendimento, branqueamento).
2. Variáveis de estado controladas (caudal, consistência, pH, temperatura, pressão).
3. Variáveis processuais activas (carga, velocidade de rotação).
4. Variáveis processuais passivas (geometria das guarnições³, material das barras, microestrutura das barras).

³ A geometria das guarnições define os ângulos e o comprimento de corte, assim como o fluxo da suspensão fibrosa no interior do refinador.

Consumo energético

O gasto da energia eléctrica na refinação de pastas químicas é de cerca de 720 – 1800 MJ/ tonelada de pasta (200-500 kWh / t) (Ebeling, 1980). Para uma fábrica de papel produzindo 100,000 toneladas por ano, os custos directos de energia representavam em 1980 meio milhão de dólares anuais. Embora em termos relativos não seja dominante nos custos de produção, representa no entanto um potencial elevado de poupança e lucro. Isso é assim porque o custo de energia é dominante (cerca de 80%) nos custos totais de refinação, incluindo custos de capital e de substituição de pratos e discos desgastados.

Factores primordiais de investigação na área da refinação

Assim, existem três factores de importância primordial para a análise e investigação da refinação:

1. Estudo do potencial de fibras com características específicas.
2. Controlo das variáveis operacionais da refinação.
3. Optimização das propriedades da pasta (por exemplo a sua drenagem) e do papel e minimização dos consumos energéticos.

Ainda não existe uma teoria geral de refinação azeite, que diga exactamente qual o efeito das diversas variáveis de controlo sobre as modificações estruturais provocadas (ou seja, o resultado da refinação) (Ebeling, 1980).

Muita da investigação no passado tem sido nas linhas de avaliação das pastas, mas nos anos recentes uma quantidade considerável de pesquisa tem-se orientado para o processo de refinação (Waterhouse, 1997; Radoslavova, Roux e Silvy, 1995; Roux, 2001). Deste modo, as possibilidades técnicas de controlo do processo de refinação têm progredido.

O conhecimento crescente relativo à estrutura do papel e como ela é afectada pela estrutura e composição das fibras componentes tornaram possível deduzir-se (até um certo grau) quais são as modificações estruturais desejadas na parede celular das fibras componentes após refinação. Da mesma forma, o efeito das mudanças estruturais indesejáveis também é igualmente conhecido.

Parece haver um acordo geral sobre quais são as mudanças estruturais primárias e morfológicas (por exemplo o teor de finos e os cortes nas fibras) causadas pela refinação (Emerton, 1980; Atack, 1978), embora a sua importância relativa gere algum desacordo entre as diversas escolas de pensamento (Ebeling, 1980; Clark, 1985).

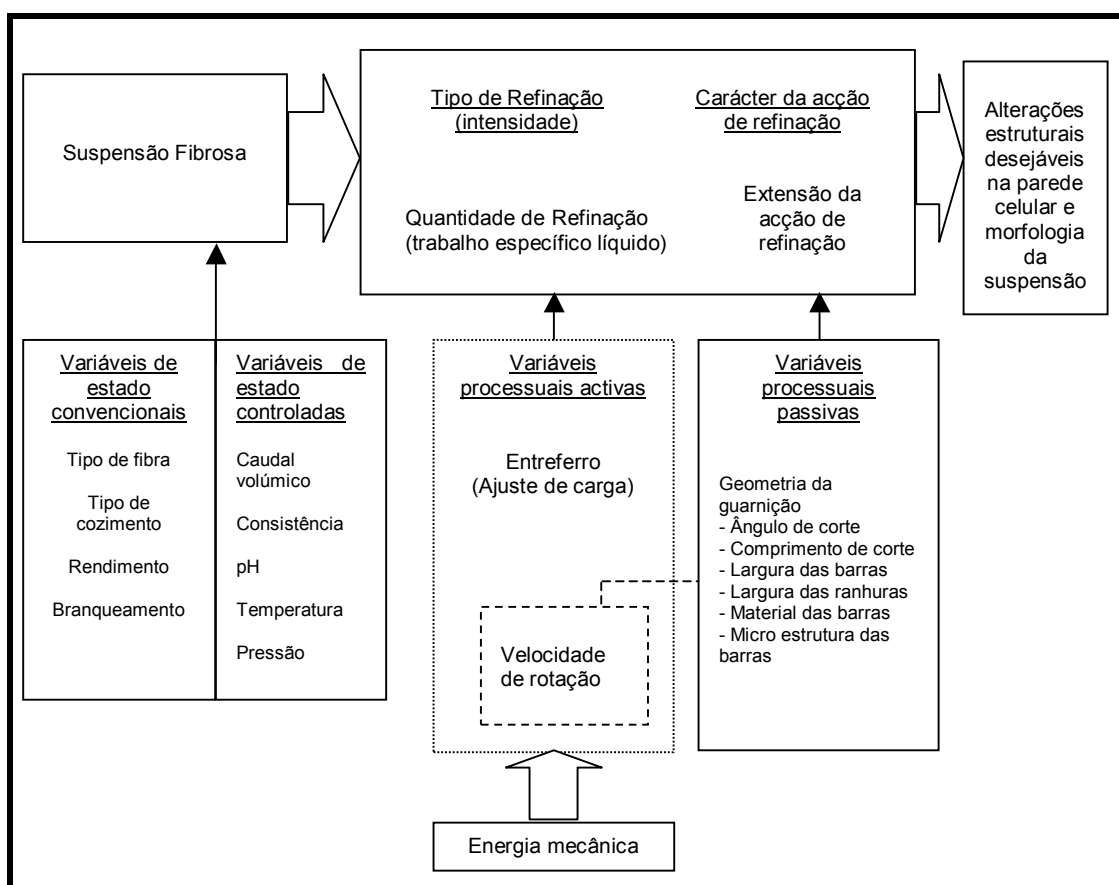


Tabela 1-1 Variáveis processuais (Fonte: Fox, 1980; Ebeling, 1980)

1.2. Efeitos da refinação

O enfoque inicial da investigação na área da refinação assentou sobretudo nas mudanças fundamentais ocorridas nas fibras papeléiras durante a refinação (Atack, 1978), assim como na caracterização de pastas (Ebeling, 1980).

Efeitos primários da refinação

Pode-se definir como efeito primário da refinação toda aquela modificação na estrutura da fibra que possibilite – pelo menos em teoria – diferenciar as fibras

refinadas e não refinadas (Ebeling, 1980). Outro requisito é que não se possa dividir em componentes. Deve ainda ser uma modificação estrutural irreversível. As revisões de Atack (1978), Clark (1978), Emerton (1980) e Ebeling (1980) fornecem uma análise detalhada dos efeitos primários da refinação sobre as fibras. As evoluções ao longo do tempo nos conceitos envolvidos estão sintetizadas na Tabela 1-2.

EFEITOS PRIMÁRIOS DA REFINAÇÃO		
<i>Histórico</i>	<i>Higgins and Young (1962)</i>	<i>Giertz (1964)</i>
<ul style="list-style-type: none"> ○ Corte/ delaminação ○ Fibrilação externa ○ Hidratação 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Corte de fibras ○ Fibrilação externa ○ Ruptura de pontes de hidrogénio intrafibra ○ Produção de finos 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Corte e esmagamento ○ Ruptura sucessiva de camadas externas da parede celular e a sua subsequente perda ○ Ruptura de pontes de hidrogénio intrafibra ○ Formação de deslocamentos
<i>Ebeling (1969)</i>	<i>Fahey (1970)</i>	<i>Clark (1977)</i>
<ul style="list-style-type: none"> ○ Corte de fibras ○ Ruptura sucessiva de camadas externas da parede celular e a sua subsequente perda ○ Delaminação das camadas da parede celular interna ○ Deslocações locais da estrutura da parede celular ○ Dissolução dos componentes químicos da parede celular e formação simultânea de carboidratos coloidais 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ruptura de ligações covalentes ○ Ruptura de pontes de hidrogénio intrafibra 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Corte de fibras ○ Delaminação externa ○ Delaminação interna ○ Produção de fragmentos ○ Compressão longitudinal ○ Efeitos secundários

Tabela 1-2 Efeitos primários da refinação (Fonte: Ebeling, 1980)

A distribuição e a intensidade dos efeitos primários da refinação sobre as fibras são muito heterogêneos. As causas que podem ser apontadas são:

1. As fibras têm uma ampla distribuição de dimensões, ou seja no comprimento, diâmetro, espessura da parede celular, ângulo fibrilar e em propriedades físicas tais como a flexibilidade e resistência mecânica.
2. A composição química da parede celular e a distribuição dos constituintes principais na parede celular variam muito.
3. O mecanismo de transferência de energia mecânica para as fibras e a criação de efeitos primários obedece a uma função de probabilidade.
4. O padrão de fluxo através do refinador é heterogêneo.
5. O tipo e intensidade do tratamento no interior da fibra são localizados.

Analisa-se nos parágrafos subsequentes a evolução dos conceitos relativos aos seguintes efeitos primários: a fibrilação (interna, externa e molecular) e os efeitos destrutivos (corte e geração de finos). Faz-se ainda uma referência aos efeitos secundários.

Conceito de fibrilação interna

A fibrilação interna consiste na delaminação interna essencialmente tangencial da estrutura coaxial da parede celular com embebição de água. A estrutura da parede celular de uma fibra, neste caso um traqueído de conífera, pode ser observada na Figura 1-3. Esta contém uma lamela média M, uma parede primária P e três camadas de parede secundária S1, S2 e S3.

Emerton, em 1957, teve uma contribuição notável ao utilizar as técnicas de microscopia na avaliação das modificações ultraestruturais que ocorrem nas fibras durante a refinação, (Atack, 1977). Ele reiterou e estendeu o conceito postulado na década de trinta por Campbell de fibrilação interna. A fibrilação interna seria a delaminação da parede média secundária da fibra ocorrida durante a refinação. Evidências experimentais eram então escassas e circunstanciais. Page e De Grâce (1967) observaram a delaminação em fibras de pasta ao sulfito e ao sulfato de baixo rendimento, ao longo da refinação de baixa consistência. McIntosh (1967) observou igualmente delaminação e intumescimento nas secções transversais de fibras de *Pinus*

taeda refinadas. Stone e Scallan propuseram um modelo estrutural da parede celular semelhante ao observado microscopicamente nas fibras refinadas e intumescidas com água (Scallan, 1978). O seu modelo foi baseado numa técnica de medida de absorção da água chamada de ‘exclusão do soluto’, que permitiu a avaliação quantitativa rigorosa da distribuição de tamanho dos poros da parede da fibra intumescida com água.

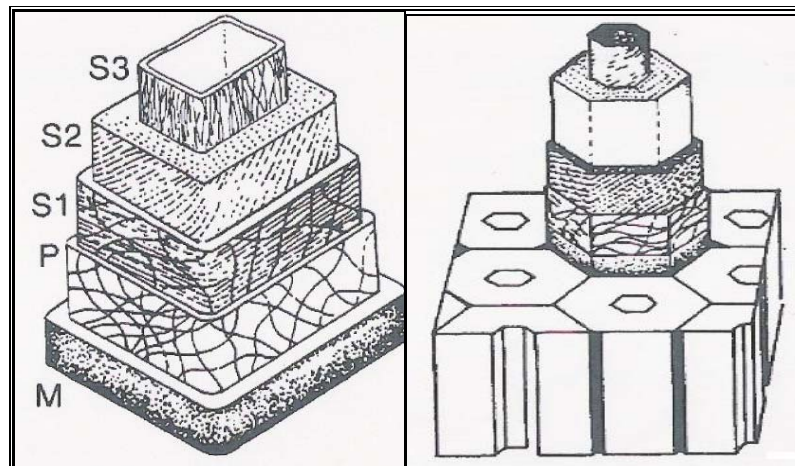


Figura 1-3 Estrutura parede celular da fibra (traqueído de conífera).

A fibrilação externa

A fibrilação externa envolve a desagregação, separação e perda parcial de material lamelar e microfibrilar (visível ao microscópio óptico) das camadas externas da parede celular. As paredes externas das fibras das resinosas permanecem essencialmente intactas ao longo dos processos de cozimento convencionais. A refinação subsequente rompe e progressivamente remove estas camadas. A natureza da composição química e da superfície exposta é importante a dois níveis. Primeiro, a amplitude da ruptura da parede externa pode controlar a quantidade de fibrilação interna e externa. Depois, a resistência das ligações desenvolvidas entre as fibras é finalmente determinada pela natureza química das superfícies expostas durante as últimas fases de remoção da água. É actualmente reconhecido que partes consideráveis da parede secundária externa e da parede secundária média são removidas durante a refinação (Atack, 1977). Os efeitos principais da fibrilação interna e externa sobre as propriedades da fibra são o aumento da sua capacidade de

absorção de água (com o conseqüente intumescimento) e a plastificação e flexibilização da fibra (Emerton, 1980). Na fibrilação externa criam-se igualmente novas áreas de ligação. De importância crucial é o aumento da superfície específica das partículas na suspensão fibrosa, que vai diminuir a aptidão para a drenagem da água sobre a tela da máquina de papel; trata-se de um parâmetro fulcral para a produtividade global do processo de produção do papel.

A fibrilação molecular e dissolução de material da parede celular

A fibrilação molecular é definida como a solubilização parcial de estruturas poliméricas da matriz de componentes da parede celular. Não existe evidência directa, mas existem resultados que indicam que uma pequena parte dos materiais da parede celular é dissolvida durante a refinação (Levlin e Nordman, 1977). As quantidades relatadas de material dissolvido variam entre 0,5% e 4% para pastas de resinosas. Este facto afecta assim o rendimento em massa da produção de papel.

O corte de fibras, geração de finos

O corte de fibras e o desprendimento de partes da lamela (“geração de finos”) constitui um efeito primário da refinação, facto acerca do qual existe abundante evidência experimental (Ebeling, 1980). O desprendimento de material lamelar e microfibrilar da parede celular é frequentemente apelidado de “geração de crill”, existindo também significativa evidência experimental.

Efeitos secundários

Alguns dos efeitos secundários catalogados são a compressão longitudinal (da qual existem boas evidências experimentais), o enrolamento ou endireitamento da fibra e o colapso da parede celular. Silvy (1975; 1999) refere um efeito fundamental que é o da compressão radial das fibras. Esta compressão provoca uma extensão radial das fibras que provoca finalmente um efeito de corte e encurtamento.

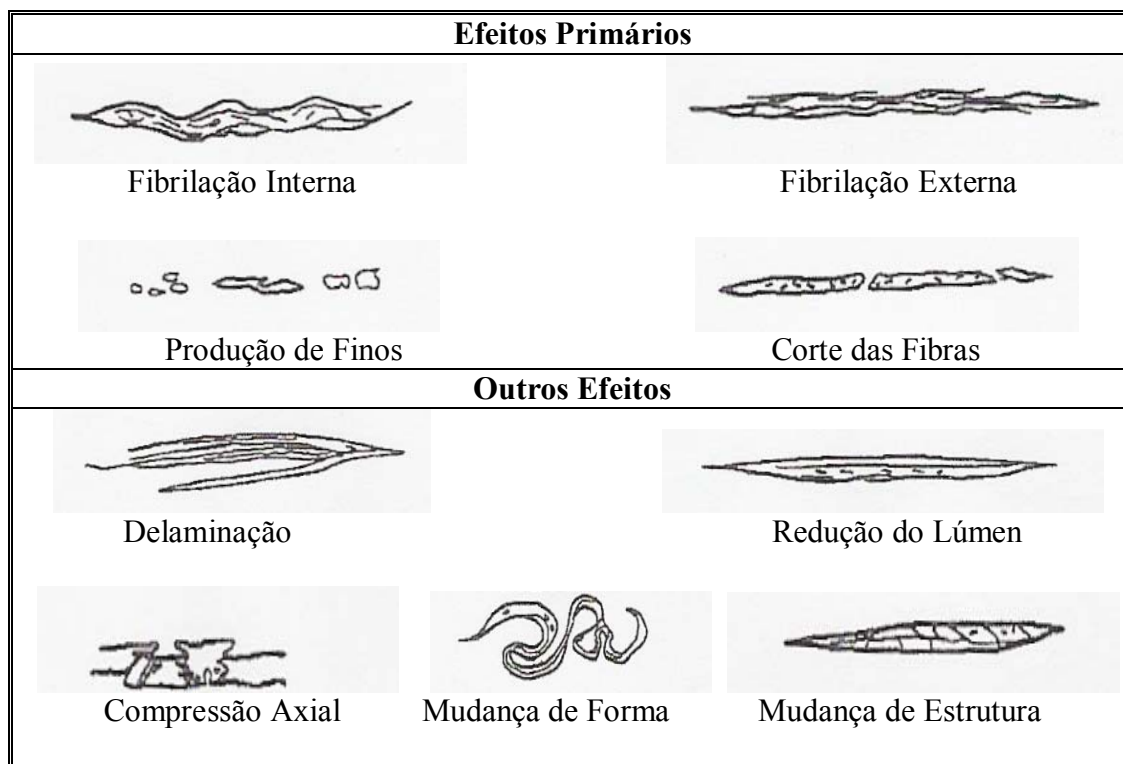


Figura 1-4 Alguns efeitos da refinação (Fonte: Stevens, 1992)

Compilação dos efeitos da refinação sobre a fibra

Page catalogou em 1989 os efeitos da refinação nas características das fibras nos seguintes pontos (Waterhouse, 1997):

1. Corte ou encurtamento das fibras.
2. Produção de finos.
3. Modificações externas da estrutura da fibra (fibrilação externa, remoção parcial da parede da fibra).
4. Modificação interna da estrutura da parede (delaminação, fibrilação interna, intumescimento).
5. Enrolamento ou endireitamento da fibra.
6. Indução de compressões ou sua remoção (criação de nódulos, dobras, planos de deslizamento, microcompressões na parede celular ou sua remoção da parede).
7. Dissolução ou lixiviação de matéria coloidal para o meio aquoso.
8. Redistribuição das hemiceluloses do interior para o exterior da parede celular.

9. Abrasão da superfície a um nível molecular para produzir uma superfície mais gelatinosa.

A Figura 1-4 oferece uma visualização esquemática de alguns destes efeitos. Assim aí são esquematizados alguns efeitos primários como a fibrilação interna, a fibrilação externa, a produção de finos e o corte das fibras. Outros efeitos aí apresentados são a delaminação, a redução do lúmen, a mudança de forma, a mudança de estrutura e a compressão axial.

1.3. Mecanismo da refinação

Fizeram-se progressos significativos nas últimas três décadas no conhecimento do mecanismo exacto de transferência de energia para as fibras. Diferentes abordagens à análise desse mecanismo foram efectuadas, passando-se nos próximos parágrafos a descrever os respectivos fundamentos. A Tabela 1-3 discrimina a evolução das diferentes teorias para o mecanismo da refinação. Apresentam-se seguidamente os conceitos básicos e a evolução das diferentes teorias que foram sendo desenvolvidas.

Refinador como uma Máquina Hidráulica

O refinador convencional munido de barras pode ser considerado como uma máquina hidráulica, visto que nos refinadores ocorrem fenómenos de fluxo de um fluido sujeito a forças normais e tangenciais. As fórmulas apropriadas são estabelecidas no artigo elaborado por um comité reunido pela TAPPI para o efeito (TAPPI, 1971), aonde se desenvolvem as expressões básicas daquelas forças aí desenvolvidas, relacionando-as com as condições de operação do equipamento (carga, velocidade de rotação), a potência consumida e a geometria do equipamento.

Diversos autores (Herbert e Marsh, 1968; Leider e Nissan, 1977; Leider e Rihs, 1977) desenvolveram fórmulas que distinguiam o consumo em vazio (abarcando o bombeamento, a circulação e perdas por turbulência) e o consumo útil absorvido pelo filme hidráulico (em que a energia aparece sob a forma de calor, em complemento do calor produzido pela hidratação da fibra, que é exotérmica).

HIPÓTESES DE MECANISMOS DE REFINAÇÃO	
Hipótese	Autoria
Teoria da Película Fibrosa	Smith – 1922 Goncharov – 1971
Modelos Hidrodinâmico	Rance – 1951 Steenberg – 1951 Radoslavova et al – 1995
Tipo e Grau de Tratamento	Danforth – 1962 Van Stiphout – 1964 Brecht et al – 1964 Leider & Nissan – 1977 Kline – 1978 Kerekes – 1990
Análise do Fluxo	Halme – 1962 Pashinskii – 1964 Fox et al – 1978
Distribuição dos Tempos de Residência	Korda – 1959 Arjas et al – 1969 Fox et al – 1979
Modelos Descritivos	Steenberg – 1963; 1979 Giertz – 1964 Clark – 1977
Tratamentos de Flocos	Page et al – 1962 Banks – 1967 Ebeling – 1979 Martinez – 1994
Modelos Mecanicistas	Goncharov – 1971 Joris – 1986 Caucal et al – 1991 Martinez – 1994 Roux et al – 1999

Tabela 1-3 Hipóteses para mecanismos de refinação

Leider e Nissan (1977) consideraram duas hipóteses no cálculo dos requerimentos energéticos do processo de refinação. Na primeira, a suspensão fibrosa comporta-se como um sólido contínuo e dissipa a energia de fricção. Na segunda hipótese a suspensão é tratada como um fluido homogêneo. No primeiro caso, a pressão exercida aparece como força motora da transferência de energia, enquanto que no segundo caso a espessura do filme é crítica para a dissipação viscosa de energia.

Mecanismo de absorção da acção de refinação

Ao longo dos anos, muitas hipóteses foram avançadas para explicar a absorção do trabalho de refinação pelas fibras. As primeiras explicações para a acção da refinação sobre as fibras basearam-se no raciocínio dedutivo, entre as quais se destacam:

- a) Corte das fibras entre arestas que se cruzam.
- b) Fricção, compressão e impacto entre as superfícies das lâminas.

Teoria da película fibrosa (“Fibrage Theory”)

Smith propôs em 1922 que uma barra do refinador que se move na suspensão recolhe uma película na aresta frontal, tal como a barra do estator quando a suspensão flui sobre ela (Atack, 1977; Ebeling, 1980). A acção de refinação resulta dos seguintes factores:

- a) Acção de corte das lâminas sobre a película quando as arestas se cruzam.
- b) Deslizamento da barra e das películas de fibras na sua aresta, exercendo pressão na película de fibras na aresta e na película de fibras na barra fixa.

Smith derivou fórmulas para a capacidade do refinador e para controlar o tipo de refinação. Desenvolveu o conceito de pressão real de refinação P , sendo:

$$P \propto \frac{P_r}{1/2 l_f}$$

P_r – Pressão específica na aresta (N.m^{-1}).

l_f - Comprimento médio da fibra (mm).

Smith assume que as arestas que se cruzam estão uniformemente cobertas por uma película de fibras.

Em 1971 Goncharov no seu estudo de forças de compressão e de corte exercida nas barras durante a refinação propôs também um mecanismo de película fibrosa (Atack, 1977; Ebeling, 1980). No entanto, trabalho experimental adicional é necessário para desenvolver provas que suportem este modelo.

Refinação como um processo de lubrificação

Rance e Steenberg publicaram em 1951 resultados que analisaram a refinação como um processo de lubrificação numa chumaceira de rotação (Ebeling, 1980).

O objectivo da lubrificação é a redução da fricção, do desgaste e do aquecimento dos elementos de máquinas que se movem entre si. Um lubrificante é qualquer substância que, quando inserida entre duas superfícies que se movem, perfaz aquele propósito. Assim, numa chumaceira um veio roda no interior de uma manga, ocorrendo um deslizamento contendo normalmente um lubrificante (Shigley, 1986, p.419-466). De igual modo, todos os refinadores podem ser considerados como uma chumaceira, em que as camadas de fibras actuam como um lubrificante entre o rotor e o estator. Desta forma, a refinação pode ser observada como um processo de lubrificação.

Nos seus estudos, Rance utilizou um refinador hidrafiner de alta velocidade e um refinador cónico Jordan. No primeiro caso, o refinador funcionava próximo das condições de ruptura do filme lubrificante. No segundo caso, trabalhava-se nas condições de ruptura do filme lubrificante.

Steenberg conduziu as suas experiências utilizando um refinador Valley laboratorial, variando a consistência, a carga e a velocidade de rotação. Utilizou uma pasta solúvel⁴ tratada com alcali a alta temperatura; tratou-se assim de uma pasta de evolução muito lenta. Foi possível concluir-se que o refinador Valley funciona em condições de lubrificação hidrodinâmica⁵. Constatou-se ainda que o coeficiente de fricção e a viscosidade aparente diminuem com o progresso da refinação.

Conceito do tipo e grau de tratamento

Nesta teoria a refinação é de facto uma operação, que pode ser controlada por um termo de intensidade e outro de extensão. Apelida-se normalmente de “ Teoria de Carga Específica de Aresta” e tem sido creditado a Brecht (1967), que se baseou no

⁴ Pasta solúvel é uma pasta ao sulfito ou ao sulfato branqueada, intensamente refinadas com um alto teor de alfa-celulose.

⁵ Neste tipo de lubrificação o fluido que suporta a carga separando as duas superfícies constitui um filme relativamente espesso de lubrificante; deste facto resulta que praticamente não ocorre contacto entre as superfícies, e a estabilidade assim obtida pode ser explicada pelas leis da mecânica dos fluidos (Shigley, 1986, p.420).

entanto no conceito de carga específica de aresta de Wulsch e Flucher (Lumiainen, 2000).

Lewis e Danforth tinham já proposto em 1962 que a refinação deveria ser expressa com base em dois termos:

- a) Número de impactos
- b) Severidade dos impactos

Danforth propôs em 1967 uma caracterização quantitativa da refinação e Van Stiphout concluiu no seu trabalho que refinadores de dimensões, guarnições e velocidades de rotação muito distintas podem tratar pastas da mesma forma, desde que os factores intensidade e extensão sejam os mesmos.

Brecht e Siewert concluíram igualmente que o resultado da refinação é definido pela carga específica de corte e pela energia líquida específica consumida.

No entanto esta teoria não entra em conta com os efeitos do material da barra, o estado da lâmina frontal da barra do rotor, a consistência, o ângulo de impacto, a direcção de rotação, a velocidade de rotação e a profundidade das ranhuras.

Em 1990, Kerekes introduziu o conceito de Factor -C. Este conceito permite calcular o número e a intensidade dos impactos, introduzindo factores relativos à geometria do refinador e ao comprimento médio ponderado em peso da fibra. A fórmula do Factor-C foi derivada para diferentes tipos de refinadores (Kerekes, 1996).

Fenómenos de transporte na refinação

Os fenómenos de transporte podem ser analisados do seguinte ponto de vista:

- a) Do comportamento do fluxo
- b) Da distribuição

Relativamente ao comportamento do fluxo, foram realizados estudos utilizando cinematografia de alta velocidade para filmar o fluxo da pasta em refinadores de discos transparentes. Banks observou em 1967 o arrastamento de fibras e flocos na lâmina frontal das barras do rotor, aí ficando durante pelo menos uma rotação (Ebeling, 1980). Fox e os seus colaboradores (1980) estudaram e modelaram as linhas de fluxo e de pressão num refinador de discos de plexiglas. Utilizou-se uma pasta resinosa Kraft branqueada com a consistência de 0,1% a 0,3%. Foi possível definirem-se três fluxos:

- a) Fluxo primário radial, que é centrífugo nas ranhuras do rotor e centrípetos nas ranhuras do estator.
- b) Vórtice secundário, resultante do movimento em espiral no interior das ranhuras provocado pelo cruzamento das lâminas do rotor e do estator.
- c) Fluxos terciários, resultante do gradiente de pressão entre as ranhuras do estator e do rotor, sendo maior no primeiro; resulta daí um fluxo no sentido das ranhuras do rotor.

A distribuição de tempos de residência e o seu efeito na refinação foi estudada em detalhe por Ryti, Arjas et al (Ebeling, 1980).

Hipótese do tratamento dos flocos

Page e os seus colaboradores foram os primeiros a afirmar em 1962 que a refinação envolva a ruptura de flocos e o tratamento de resíduos desses flocos (Ebeling, 1980). Chegaram a estas conclusões através da análise de fotografias de alta velocidade.

Banks em 1967 sumariou a mecânica da refinação da seguinte forma:

- 1- Consolidação de flocos quando estes são presos entre barras que se aproximam.
- 2- Pressão mecânica induzida pelas barras torna-se suficientemente elevada para provocar deformação plástica.
- 3- Tensão de corte é exercida nos flocos comprimidos, provocando a ruptura de flocos e fibras.
- 4- Redução da pressão mecânica permite absorção de água pelas fibras e fibrilas rompidas.
- 5- Agitação turbulenta dispersa os flocos ou seus resíduos.

De acordo com Banks, a teoria do tratamento do floco difere da teoria da película fibrosa no aspecto de que esta última teoria assume uma cobertura uniforme das lâminas das barras pelas fibras.

O aspecto novo e importante desta teoria da refinação é que as fibras não são tratadas individualmente mas são tratadas como parte de uma estrutura, ou seja, os flocos.

Estudos efectuados por Ebeling (1980) mostraram que a hipótese do tratamento dos flocos descreve o fenómeno fundamental de transferência da acção de refinação para as fibras. Os resultados obtidos com pasta Kraft branqueada do pinho do sul a uma consistência de 1,1% sugerem que as fibras se encontram na forma de flocos entre as barras. Os flocos cobrem apenas cerca de 10% da área total de cruzamento das barras. O autor conclui no seu estudo que a pressão suportada pelos flocos poderá ser até 100 vezes superior à pressão média calculada entre as barras. A tensão compressiva pode estar bem acima dos 10MPa (100atm). Esta tensão pode facilmente expulsar a água da parede celular das fibras durante o curto período em que as barras se cruzam (~ 0,2-0,5 ms).

Pode-se assim postular que o movimento da água induzida pela pressão pode ser um factor primário para a fibrilação interna. O processo de refinação pode de certa forma ser considerado como um processo de filtração da água através da estrutura fibrosa. Esta hipótese seria consistente com a tentativa bem sucedida de J. Waterhouse (1970) de refinar as fibras pelo escoamento das fibras através de um pequeno orifício (“*shear beating*”). Pode-se também postular que as forças compressivas na parede celular são suficientemente elevadas para provocar o corte das fibras (Silvy, 1975; 1999). A dimensão dos flocos observados nas ranhuras do estator chegam a atingir 4-6 mm de comprimento e 3-4 mm de largura. Os flocos não parecem ficar na superfície da barra do estator mais do que uma passagem da lâmina da barra do rotor.

Análise mecanicista da refinação

Nesta perspectiva de análise devem referir-se os resultados apresentados em 1971 por Goncharov (Ebeling, 1980; Attack, 1978). Neles, o autor mediu as forças normais e tangenciais exercidas numa barra típica dum refinador de disco único durante a refinação de uma pasta ao sulfito não branqueada com uma consistência nominal de 2.5% a 3%. Veja-se na Figura 1-5 a variação na força normal R (kgf/cm) e na pressão específica P (kgf/cm²) desenvolvidas quando o elemento do rotor dr passa pelo elemento do estator ds . Quando a pressão máxima é inferior a 20 kgf/cm² tem-se

a configuração *A* para o perfil de *R* e de *P*, ocorrendo a configuração *B* quando a pressão máxima é superior àquele valor. No primeiro caso, *R* e *P* passam por um máximo único na transição entre a zona *a* e *b*, sendo a pressão praticamente nula na zona *c*; no caso *B*, *R* e *P* passam por um máximo junto à aresta durante o cruzamento entre rotor e estator (zonas *a* e *b*), passando-se por um máximo de valor mais reduzido na zona *c*.

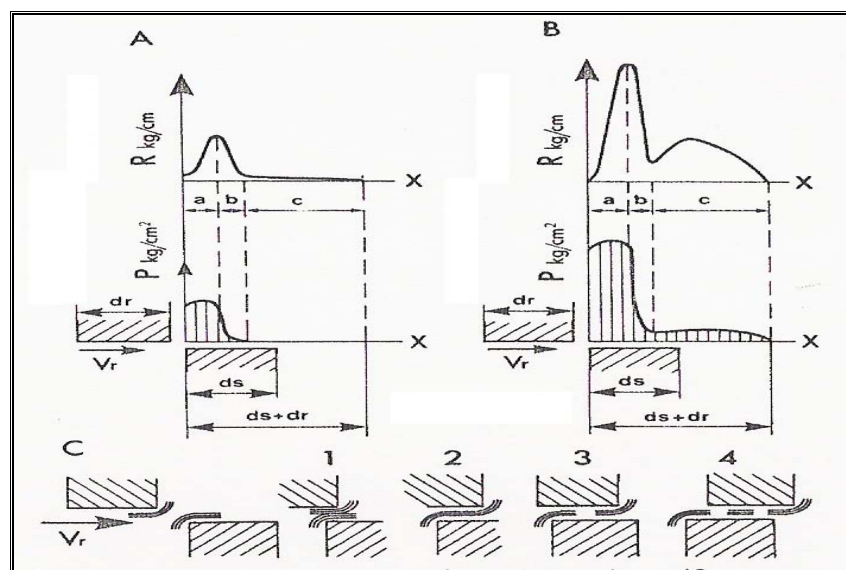


Figura 1-5 Diagramas de forças e pressões (Fonte: Goncharov, 1971)

A *École Française de Papeterie* desenvolveu com a empresa *Aciéries de Bonpertuis (France)* uma teoria matemática da refinação (Joris, 1986). Esta teoria permite otimizar a geometria da guarnição do refinador, utilizando um método chamado de “diagramas bijectivos”.

Caucal et al (1991 a 1995) efectuaram um estudo físico hidráulico da refinação, em que se analisaram as flutuações de pressão na superfície da lâmina de um refinador de discos, as forças de compressão axial e a influência de diversos parâmetros no coeficiente de fricção global.

Roux et al (1999) desenvolveram uma teoria hidromecânica da refinação. Nela faz-se uma descrição matemática das forças hidromecânicas que ocorrem nas zonas de cruzamento das barras do entreferro. Essa descrição foi desenvolvida para refinadores cónicos e de discos para baixas consistências (entre os 2% e os 6%).

Radoslavova, Silvy e Roux (1995) modelaram a hidrodinâmica da refinação de um refinador laboratorial Voith, tendo por base a equação de Reynolds. Esse modelo segue a linha da refinação como um processo de lubrificação.

Martinez e Kerekes (1994) e Batchelor e Ouellet (1997) estudaram as forças exercidas sobre flocos de fibras num refinador de ‘barra única’. Desenvolveram igualmente modelos para a previsão das forças normais e tangenciais exercidas sobre um floco ideal. Outros estudos sucederam-se a estes, analisando e modelando as forças normais, as forças tangenciais e uma força de aresta, em inglês “*corner force*” (Kerekes, 1996; Martinez, 1997; Batchelor, 1997; 1999; 2001; Senger, 2002). Observe-se a Figura 1-6 aonde se representa uma esquematização do modelo das forças envolvidas. A Figura 1-7 representa a força normal e a força tangencial que são exercidas sobre a barra do estator em função da distância da sua aresta (Batchelor e Ouellet, 1997). Pode-se verificar que a força normal é significativamente superior à força tangencial, conforme esperado. Constata-se igualmente um aumento significativo dessas forças junto à aresta de ataque, atingindo-se um patamar superior seguido de uma redução brusca dos seus valores. Estes valores estão de acordo com os resultados de Goncharov, como se pode observar na Figura 1-5.

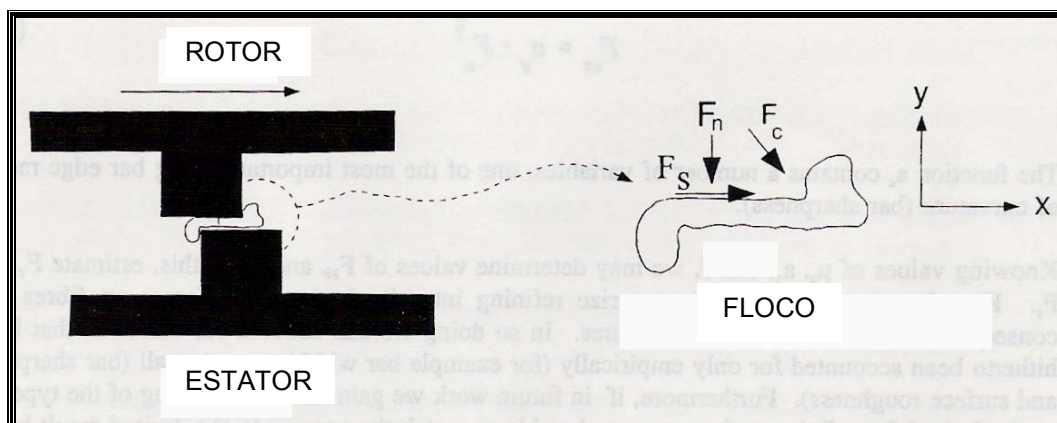


Figura 1-6 Forças exercidas no floco de acordo com Martinez (Fonte: Kerekes1996).

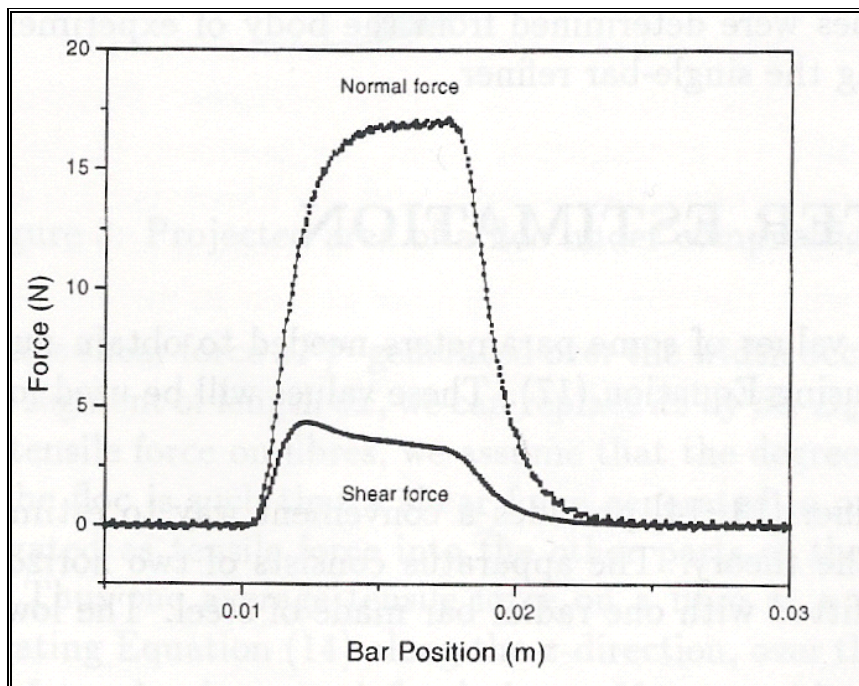


Figura 1-7 Relação entre a força normal e a força tangencial sobre o estator e a posição na barra (Fonte: Batchelor e Ouellet, 1997).

1.4. Tendências actuais

Uma boa teoria da refinação permitirá aumentar a eficiência da refinação e obter novas combinações de propriedades inatingíveis com as técnicas de refinação actuais. Ebeling referia em 1980 que um dos motivos para a falta de uma teoria concisa da refinação seria a subestimação do papel da estrutura em rede e da flocculação da pasta no processo de refinação.

Os flocos têm dois papéis críticos na refinação. Por um lado os flocos, devido à sua enorme dimensão em relação à dimensão do entreferro, diminuem a probabilidade de as fibras serem tratadas na zona de refinação. Reduz-se assim a eficiência da refinação. Por outro lado, os flocos protegem muitas das fibras de efeitos catastróficos na refinação.

Junta-se ainda o facto de que a desfloculação aumenta algumas das propriedades do papel (Koch, 1994). Este raciocínio levou a concluir que para aumentar a eficiência da refinação, dever-se-iam tratar fibras e não flocos. A zona de refinação deveria ser concebida de maneira a que todas as fibras tivessem uma elevada probabilidade de serem tratadas. Provavelmente seriam necessárias diversas

zonas de refinação. A zona de refinação deveria reduzir consideravelmente em volume, de maneira a reduzir perdas em turbulência e deformações desnecessárias de fibras e flocos. Novos materiais poderiam ser desenvolvidos para a zona de refinação. Assim as propriedades elásticas das superfícies de atrito poderiam ser ajustadas às propriedades da parede celular a ser modificada pela refinação (Jacquelin, 1964).

Em 1989, Page estabeleceu sete objectivos desejáveis para a investigação futura na área da refinação, que foram os seguintes (Waterhouse, 1997):

1. Descrição físico-química da matriz da estrutura da parede celular mais precisa.
2. Medição mais rápida do comprimento da fibra, da massa linear, da espessura da parede celular e do ângulo das fibrilas.
3. Melhor caracterização de pastas e matérias-primas.
4. Medição mais rápida dos efeitos da refinação, i.e., fibrilação, rupturas na parede celular, microcompressões, dobras e curvatura.
5. Análise factorial da refinação⁶.
6. Imagens melhoradas da zona de refinação, especialmente a captura do movimento das fibras individuais.
7. Teoria mecanicista da refinação em termos das tensões sofridas pelas fibras e as suas respostas àquelas tensões.

Desde então, os pontos nos quais a investigação se tem concentrado são os relativos à morfologia da fibra, à análise factorial da refinação e à teoria mecanicista da refinação. Esta tese procura, tanto quanto possível, fazer uso e contribuir para estes progressos.

⁶ Análise factorial é uma técnica de redução de dados que pode ser utilizada para reduzir um grande conjunto de variáveis interrelacionadas a um pequeno número de factores comuns. Veja-se El-Sharkawy, Lias e Paulapuro (2004).

2. Equipamento e Hidrodinâmica

2.1. Descrição da instalação e calibração dos equipamentos

A desintegração das pastas foi efectuada num desintegrador Lamor funcionando a 1200 rpm durante 20 minutos à temperatura ambiente, estando a pasta a uma consistência de 3,6%. As refinações realizadas neste estudo foram efectuadas num refinador Valley laboratorial da Lorentzen & Wettre (Lorentzen & Wettre, 1985), ao qual se acrescentou as seguintes funcionalidades:

1. Variação de velocidade de rotação. Para isso realizou-se a adaptação de um variador de velocidade Altivar 16.
2. Medição de energia eléctrica consumida. Esta foi efectuada no dispositivo de medida digital de grandezas eléctricas MDGE (Espírito Santo, 2001).
3. Medição do valor do entreferro. Este valor foi obtido através da medida da posição do braço da alavanca por um transdutor LVDT⁷ Sensorex com uma ligação a uma carta de saída RS232C da série Kosmos e de um software de aquisição de sinal.



Figura 2-1 Refinador Valley laboratorial e desintegrador.

⁷ LVDT: linear variable differential transformer.

Na Figura 2-1 podemos observar uma perspectiva do refinador Valley sem a sua cobertura, assim como um termopar para a aquisição do valor da temperatura da suspensão fibrosa em contínuo. Ao fundo pode-se observar o desintegrador Lamort.

Utilizou-se água desmineralizada pela unidade de desmineralização AquaIonic (AquaIonic, 1998). Os valores de condutividade obtidos mantiveram-se normalmente em valores inferiores a $7\mu\text{S}/\text{cm}$ (à temperatura de 25°C). De acordo com a norma TAPPI T200 sp-96 o valor ideal da condutividade da água a 25°C seria $1\mu\text{S}/\text{cm}$ ⁸. No entanto valores da ordem de $4\mu\text{S}/\text{cm}$ são aí considerados aceitáveis. Sempre que a condutividade ultrapassou o valor de $10\mu\text{S}/\text{cm}$ regeneraram-se as resinas.

2.1.1. Adaptação e calibração do refinador Valley

As características exigidas para o refinador Valley laboratorial estão definidas na norma TAPPI T200 sp-96. A Figura 2-2 apresenta um esquema do equipamento. A tina de circulação da pasta tem um volume de 25 litros. O fluxo da pasta é provocado pelo movimento do rotor, conforme esquematizado na Figura 2-3.

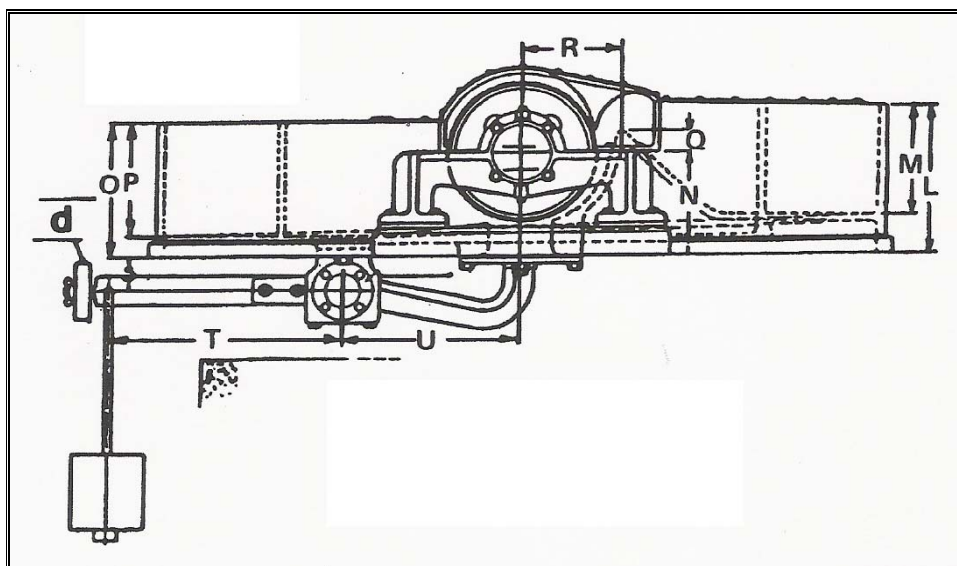


Figura 2-2 Esquematização do refinador Valley (Fonte: Norma Tappi T200 sp-96, 1996)

⁸ Valor da água Tipo II, da nomenclatura ASTM (American Society for Testing and Materials).

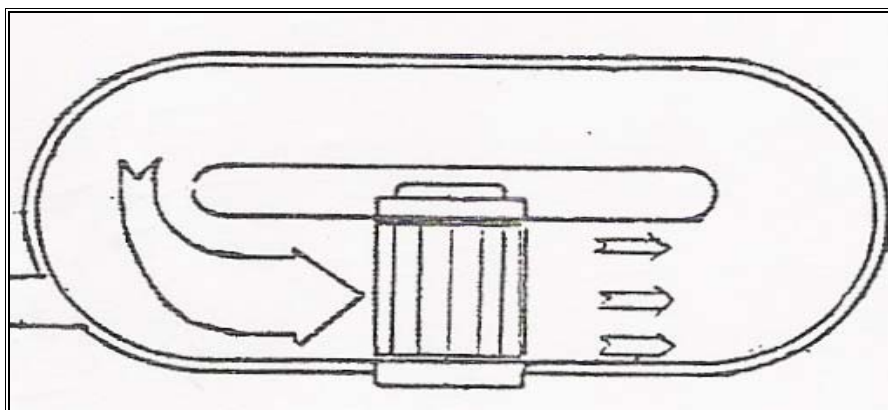


Figura 2-3 Fluxo de pasta no refinador Valley (Fonte: Valley Beater Operating Instructions, 1985)

O rotor e o estator são fabricados com aço inoxidável Tipo 410.⁹ A dureza Brinell das barras do rotor é de 350 a 400 e a do estator é de 325 a 375.

O rotor contém 32 barras com uma espessura de 4,8 mm, tendo um diâmetro de 193,8mm e uma largura de 152,4mm. O estator possui 7 barras com 3,2mm de espessura, estando distanciadas entre si de 2,4mm. Têm a forma de um V, efectuando um ângulo de 5° em relação às barras do rotor. O espaçamento entre as barras do estator é preenchido com madeira de carvalho branco seca num fornalha. Pode-se ver uma imagem do estator na Figura 2-4. A direcção do movimento do rotor e da circulação da pasta na tina ocorre no sentido ascendente da figura, de acordo com a seta \vec{V} ao lado da imagem.



Figura 2-4 Estator do refinador Valley

⁹ Nomenclatura da AISI (American Iron and Steel Institute), com um teor de cromo entre 11,5% e 13,0%.

O estator foi desenhado de maneira a se conformar com as barras do rotor. Verificou-se por uma metodologia desenvolvida para o efeito (ver Anexo 1 – Determinação da área sobreposta rotor-estator) que a área sobreposta entre o rotor e o estator durante a rotação é constante. O seu valor é equivalente à área de duas barras do estator, correspondendo a $1.019,5\text{mm}^2$. É assim possível calcular a pressão média entre barras, assim como as tensões exercidas no entreferro (tensões normais e de corte).

O refinador Valley é utilizado de uma forma corrente nos laboratórios para estudos de investigação, para avaliar novas pastas, como base para o controlo do processo quando se usam pastas com características variáveis e para o controlo de qualidade em unidades fabris de produção de pasta.

O princípio de funcionamento do refinador Valley apresenta algumas vantagens tecnológicas em relação aos refinadores de discos e refinadores cónicos (Gabl, 2004). Algumas tentativas para transpor e implementar este princípio à escala industrial têm sido ensaiadas (Gabl, 2004; Clark, 1985). Algumas das vantagens referenciadas por Gabl são:

1. A velocidade tangencial do rotor mantém-se constante em toda a zona de refinação.
2. É possível conceber-se um desenho das lâminas de maneira a manter-se um ângulo de corte constante em toda a zona de refinação.
3. Uma zona de refinação com um ajuste muito estável leva a uma estabilidade na refinação, mesmo quando os caudais de pasta variam.

Adaptação do Equipamento

Um dos objectivos deste estudo foi analisar os efeitos das variações de carga e da velocidade de rotação do rotor na refinação. Ora o refinador Valley standard está concebido para ter uma velocidade de rotação do rotor de $500\text{rpm}\pm 10\text{rpm}$. Desta forma foi necessário adaptar-lhe um variador electrónico de velocidade Altivar da Telemecanique (Telemecanique, 1996). Posteriormente efectuou-se uma calibração com um estroboscópio, estabelecendo-se uma relação linear entre a frequência da corrente de alimentação ao motor e a velocidade efectiva de rotação do rotor. Os resultados estão compilados no Anexo 2 – Curva de calibração da velocidade de

rotação. Da mesma forma, foi necessário mandar fabricar pesos suplementares de 1 kg para variação da carga no refinador, já que o refinador Valley apenas estava equipado para cargas de 4,5kg e 5,5kg.

Calibração do Refinador Valley

Uma operação fundamental para um estudo deste tipo é a calibração do refinador Valley, de maneira a que as condições de refinações se mantenham constantes ao longo do período de realização dos ensaios. Em particular, é necessário assegurar que o estado das lâminas persista, para que os resultados dos ensaios sejam fiáveis. Na Figura 2-5 pode observar-se a regularidade do fio das lâminas e o efeito das forças tangenciais exercidas na zona do entreferro (na forma de linhas transversais ao bordo da lâmina). As lâminas durante o movimento de rotação do rotor seguem o sentido da seta \vec{V} . Desta forma as arestas de ataque e que sofrem o primeiro impacto ao se aproximarem do estator são a do lado inferior da lâmina, conforme se pode observar na seta A .



Figura 2-5 Fotografia das lâminas do rotor.

Para se efectuar a calibração do aparelho seguiu-se o procedimento delineado na norma TAPPI T200 sp-96. Procedeu-se à instalação de um novo estator na fase de preparação prévia do Valley. Foi necessário fazer o alinhamento entre o rotor e o estator e posteriormente realizar o ajuste entre as suas lâminas por meio de uma refinação de 23 litros de suspensão da pasta de resinosa a uma consistência de 15,6g/l misturada com 120 gramas de carborundum com uma granulometria de 80 mesh. Posteriormente efectuaram-se refinações sucessivas com carborundum com uma granulometria de 325 mesh para estabilização do estado das lâminas. Após a

estabilização do equipamento, efectuaram-se refinações com pastas padrão¹⁰, uma de resinosa e outra de eucalipto, obtendo-se curvas de refinação padrão. Periodicamente efectuaram-se ajustes finos do refinador, de maneira a mantê-lo a operar dentro dos limites da calibração. Estas curvas de calibração encontram-se no Anexo 3 – Curvas de calibração do refinador.

Metodologia de Refinação

A metodologia de refinação desenvolvida consistiu nos seguintes procedimentos:

1. Colocar 360 gramas da pasta (base seca OD¹¹) a refinar de molho em água desmineralizada com 24 horas de antecedência.
2. Desintegrar a pasta no desintegrador Lamort durante 20 minutos, após se perfazer um volume de 10 litros de água desmineralizada. A consistência da suspensão é 3,6%.
3. Transferir a pasta para a tina do Valley, perfazendo-se o volume de 23 litros, regulando a temperatura inicial da pasta para um valor de $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$.
4. Homogeneização da pasta durante dez minutos¹².

Foi possível acompanhar o desgaste das lâminas do refinador através da leitura do valor indicado no LVDT colocando o rotor e o estator em contacto (ver o Anexo 4 – Curva de calibração do LVDT).

2.1.2. Medição do consumo energético

A Figura 2-6 expõe a imagem do dispositivo MDGE (Medida Digital de Grandezas Eléctricas).

Este dispositivo foi concebido no propósito de desenvolver um equipamento que monitorize a utilização da electricidade e permita avaliar a eficiência da sua

¹⁰ A pasta padrão é mantida acondicionada em embalagens opacas à luz e fechadas de forma a manter a pasta em condições de teor de humidade constante.

¹¹ OD (oven-dry): teor de sólidos determinados em balança de infravermelhos a 105°C.

¹² Para o caso do pinho silvestre efectuou-se o controlo do pH a 9, devido a à dificuldade em controlar os elevados valores da condutividade da água. Resultante da época estival que decorria, a condutividade da água após a instalação de desmineralização atingiu o valor de 30µS/cm.

utilização (Espírito Santo, 2001). O equipamento mede as seguintes grandezas: energia activa, energia reactiva, potência activa, potência reactiva, corrente e tensão.



Figura 2-6 Dispositivo MDGE (Fonte: Espírito Santo, 2001)

O dispositivo de medida está associado a um processador digital de sinal e pode ser utilizado em qualquer configuração de rede eléctrica, monofásica ou trifásica e nesta última, quer o regime de carga seja equilibrado ou desequilibrado, com ou sem neutro acessível. O equipamento recolhe dados separadamente para cada uma das fases e salvaguarda essa informação em memória, para posterior análise, ou transmite-a em tempo real para uma aplicação residente num computador pessoal. O intervalo de aquisição do sinal é de $375\mu\text{seg}$ e o intervalo de integração do software é composto por 160 intervalos de amostragem, ou seja 0,06 seg (Espírito Santo, 2001, p.62). No presente trabalho, o sistema foi programado para efectuar as médias das medidas recolhidas em intervalos de 60 segundos.

O aparelho foi calibrado no âmbito do seu desenvolvimento com multímetros digitais de 100kHz *True RMS* com uma precisão de 0,05%. Os valores da potência activa¹³ apresentavam um erro relativo médio de 1,4%, atingindo um valor máximo de 2,0% (Espírito Santo, 2001, p.125-129).

¹³ Os valores de potência activa foram medidos aquando da aplicação de cargas resistivas a diferentes níveis de tensão, para valores entre 0 e 8000 watts.

Outros métodos alternativos de medida da potência consumida seriam possíveis de desenvolver. Alguns chegaram a ser testados antes da instalação do dispositivo MDGE, tais como um wattímetro analógico RMS e um wattímetro electrónico WECO. Uma possibilidade estudada foi a instalação no veio do rotor de uma coleira com um medidor de binário. A necessidade de se retirar o veio e o enviar para os Estados Unidos da América para instalação do sistema inviabilizou esta possibilidade. A sua principal vantagem seria a possibilidade de medição directa da potência mecânica consumida. Evitar-se-iam assim os erros decorrentes das perdas no motor eléctrico e da variabilidade das condições de fornecimento da energia eléctrica.

As limitações acima referidas, existência na UBI de *know-how* relativo à medição de grandezas eléctricas e a própria fiabilidade da instalação levaram à decisão de utilizar o dispositivo MDGE.

Previamente a cada série de ensaios efectuou-se um estudo da variabilidade e dos limites de confiança das potências consumidas para cada uma das matérias-primas: o pinho silvestre, o eucalipto e a bétula. Para cada uma das matérias-primas efectuaram-se as seguintes medições:

- Potência consumida na circulação de pasta a 400rpm, a 500rpm e a 600rpm (23 litros de pasta a uma consistência de 15,6 g/l).
- Potência consumida na refinação nas condições de operação padrão (*O*: 500rpm e carga de 5,5kg) e em quatro diferentes combinações de velocidade de rotação e carga (*A*: 600rpm e 4,5kg; *B*: 400rpm e 4,5kg; *C*: 600rpm e 6,5kg; *D*: 400rpm e 6,5kg).

Os valores foram obtidos após ter-se preparado a suspensão de pasta de acordo com o procedimento padrão, efectuando-se refinações em que se rodavam cada uma das condições acima referidas na seguinte sequência:

1. Circulação sem carga a 400rpm; circulação sem carga a 500rpm; circulação sem carga a 600rpm
2. Refinação nas condições *O*, *A*, *B*, *C*, *D*.
3. Circulação sem carga a 400rpm; circulação sem carga a 500rpm; circulação sem carga a 600rpm.

Quando possível continuou-se a refinação, repetindo-se esta sequência com a mesma pasta. Para além disso, este ensaio foi repetido diversas vezes. Com esta sequência pretendeu-se encontrar um valor médio representativo das potências eléctricas médias consumidas; estas variações são resultantes da evolução das condições hidrodinâmicas de funcionamento do refinador ao longo da refinação, devido à transformação das características da pasta. Apresentam-se nas figuras seguintes exemplos de ensaios de medição das potências consumidas, de acordo com a sequência 400rpm, 500rpm, 600rpm, *O*, *A*, *B*, *C*, *D* e novamente 400rpm, 500rpm e 600rpm. Pode-se confirmar através da observação destes gráficos a relativa estabilidade das potências consumidas ao longo da refinação.

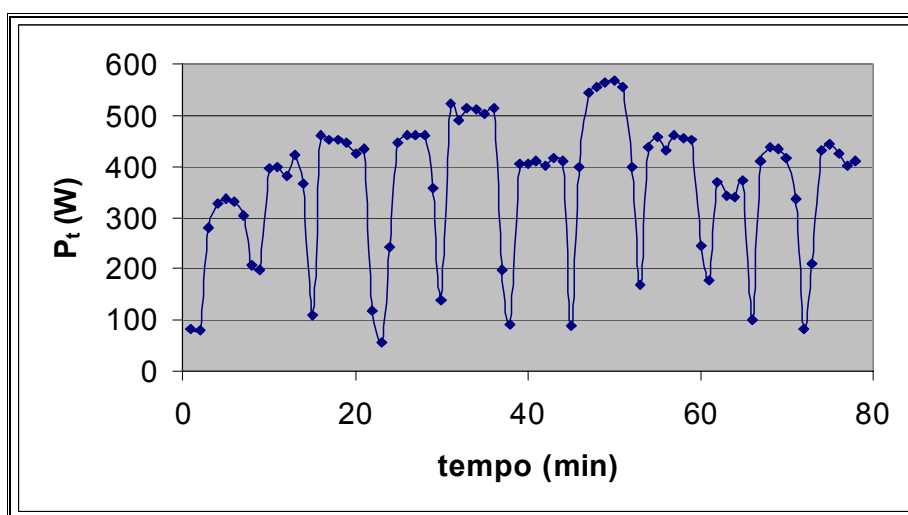


Gráfico 2-1 Ensaio de medição de potência para o pinho silvestre.

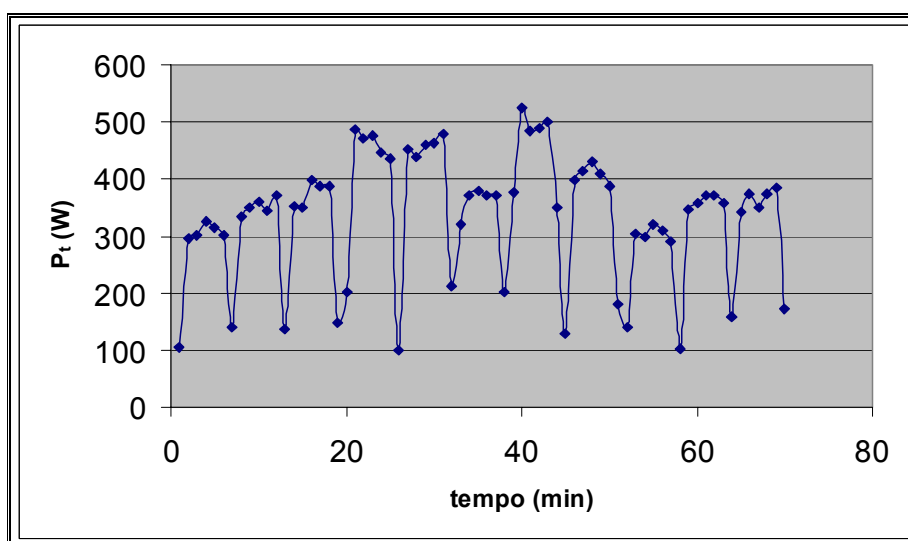


Gráfico 2-2 Ensaio de medição de potência para o eucalipto.

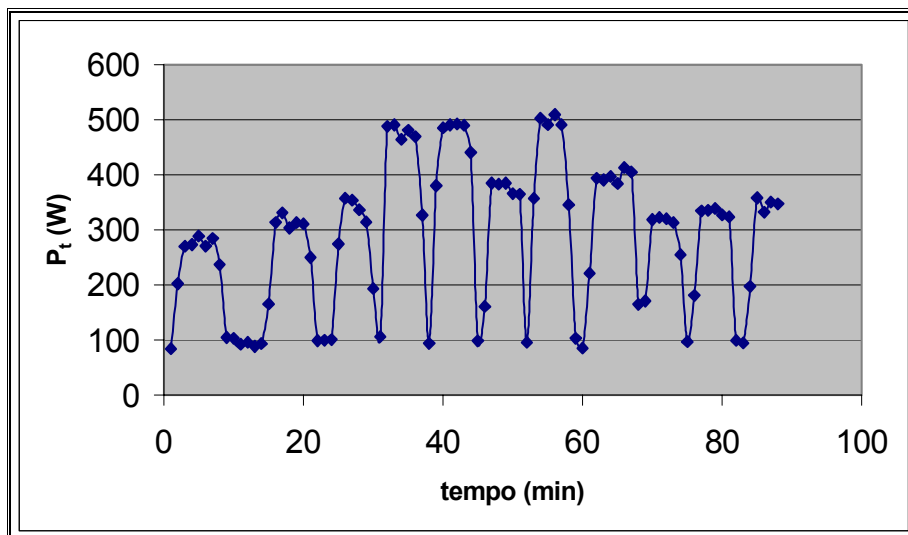


Gráfico 2-3 Ensaio de medição de potência para a bétula.

Na sequência deste ponto apresentam-se as tabelas contendo a análise de confiança das medições para o pinho silvestre, o eucalipto e a bétula. Construíram-se três tabelas para cada matéria-prima:

- Análise de confiança da potência consumida P_v na circulação de pasta (que se define como sendo a potência em vazio).
- Análise de confiança da potência total P_t consumida na refinação.
- Análise de confiança da potência líquida P_L consumida na refinação (que é dada por $P_L = P_t - P_v$).

Cada uma das tabelas contém o número de leituras (correspondendo cada leitura à média das medidas recolhidas num minuto), a média dos valores recolhidos, o desvio padrão amostral (DPA), o coeficiente de variação (CV), os limites de confiança da média¹⁴ (LC) com um nível de significância a 5% e os limites de confiança da média a 5% expresso como uma percentagem do valor médio. Para a potência líquida incluíram-se igualmente os limites de confiança com um nível de significância a 10%. Neste tratamento estatístico seguiu-se a norma SCAN-G2:63

¹⁴ Limite de confiança é o intervalo no qual o valor verdadeiro da grandeza a ser medida deverá situar-se com um grau de probabilidade de $(100-p)\%$, sendo o valor de p o nível de significância daquele limite.

“Statistical Treatment of Test Results”¹⁵. Todos os tratamentos estatísticos nesta tese foram baseados nos conceitos aí expostos.

Pinho silvestre

Análise de confiança da potência consumida na circulação de pasta (W)			
<i>Pinho silvestre</i>	400rpm	500rpm	600rpm
N.º leituras (min)	143	155	152
Média (W)	393,5	452,2	492,7
DPA (W)	27,8	24,9	28,4
CV (%)	7,1%	5,5%	5,8%
LC 5% (W)	4,6	3,9	4,5
LC 5% (%)	1,2%	0,9%	0,9%

Tabela 2-1 Potência consumida na circulação de pasta (pinho silvestre).

Análise de confiança da potência total consumida na refinação (W)					
<i>Pinho silvestre</i>	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500rpm/5.5kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg
N.º leituras (min)	47	47	86	44	35
Média (W)	431,6	465,8	529,0	600,6	629,7
DPA (W)	14,2	10,5	15,9	18,1	22,0
CV (%)	3,3%	2,2%	3,0%	3,0%	3,5%
LC 5% (W)	4,2	3,1	3,4	5,5	7,5
LC 5% (%)	1,0%	0,7%	0,6%	0,9%	1,2%

Tabela 2-2 Potência total consumida na refinação (pinho silvestre).

Análise de confiança da potência líquida consumida na refinação (W)					
<i>Pinho silvestre</i>	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500rpm/5.5kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg
Média (W)	38,1	72,2	76,8	107,9	137,0
DPA (W)	25,2	24,7	22,1	26,4	27,3
CV (%)	66,0%	34,2%	28,8%	24,5%	19,9%
LC 5% (W)	8,3	8,1	5,8	8,9	10,0
LC 5% (%)	21,8%	11,3%	7,6%	8,2%	7,3%
LC 10% (W)	2,4	2,4	1,3	2,7	3,3
LC 10% (%)	6,4%	3,3%	1,7%	2,5%	2,4%

Tabela 2-3 Potência líquida consumida na refinação (pinho silvestre).

¹⁵ As normas SCAN são emitidas pelo “Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee”

Para o pinho silvestre verifica-se que:

- Os limites de confiança com um nível de significância de 5% representam geralmente menos de 1% do valor médio nos casos da potência de consumida na circulação de pasta e da potência total.
- A potência líquida gerou variabilidades superiores, sobretudo nas condições de refinação mais suaves (400rpm e 4,5kg). Desta maneira os limites de confiança com um nível de significância de 5% situam-se entre os 7,3% e os 11,3%, com a excepção da refinação nas condições mais suaves, em que o valor é de 21,8%. Esta maior variabilidade resulta essencialmente do facto de se tratarem de valores inferiores e sobretudo por resultarem de uma diferença de valores de potência (com o conseqüente aumento do erro relativo). Pode também ter existido alguma variabilidade nas características da corrente eléctrica disponível para os diferentes ensaios.

Eucalipto

Análise de confiança da potência consumida na circulação de pasta (W)			
<i>Eucalipto</i>	400rpm	500rpm	600rpm
N.º leituras (min)	122	122	130
Média (W)	340,8	361,2	406,3
DPA (W)	31,6	45,5	41,4
CV (%)	9,3%	12,6%	10,2%
LC 5% (W)	5,6	8,1	7,1
LC 5% (%)	1,6%	2,2%	1,7%

Tabela 2-4 Potência consumida na circulação de pasta (eucalipto).

Análise de confiança da potência total consumida na refinação (W)					
<i>Eucalipto</i>	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500rpm/5.5kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg
N.º leituras (min)	69	73	70	63	64
Média (W)	412,1	438,3	465,3	519,8	553,2
DPA (W)	31,8	38,2	54,0	36,8	53,9
CV (%)	7,7%	8,7%	11,6%	7,1%	9,7%
LC 5% (W)	7,5	8,8	12,6	9,1	13,5
LC 5% (%)	1,8%	2,0%	2,7%	1,8%	2,4%

Tabela 2-5 Potência total consumida na refinação (eucalipto).

Análise de confiança da potência líquida consumida na refinação (W)					
<i>Eucalipto</i>	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500rpm/5.5kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg
Média (W)	71,3	97,4	104,1	113,5	146,9
DPA (W)	31,7	56,5	48,8	39,9	45,8
CV (%)	44,5%	58,0%	46,9%	35,2%	31,2%
LC 5% (W)	9,4	16,4	14,3	12,1	13,7
LC 5% (%)	13,1%	16,8%	13,8%	10,7%	9,3%
LC 10% (W)	2,5	4,8	3,5	3,3	3,7
LC 10% (%)	3,5%	4,9%	3,4%	2,9%	2,5%

Tabela 2-6 Potência líquida consumida na refinação (eucalipto).

Para o eucalipto verifica-se que:

- Os limites de confiança a uma significância de 5% representam geralmente menos de 2% do valor médio nos casos da potência de consumida na circulação de pasta e da potência total.
- Os limites de confiança da potência líquida encontram-se entre 9,3% e os 16,8%, o que é aceitável pelos motivos já expressos acima.

Bétula

Análise de confiança da potência consumida na circulação de pasta (W)			
<i>Bétula</i>	400rpm	500rpm	600rpm
N.º leituras (min)	82	73	80
Média (W)	316,1	361,4	378,7
DPA (W)	25,7	24,5	26,9
CV (%)	8,1%	6,8%	7,1%
LC 5% (W)	5,6	5,6	5,9
LC 5% (%)	1,8%	1,6%	1,6%

Tabela 2-7 Potência consumida na circulação de pasta (bétula).

Análise de confiança da potência total consumida na refinação (W)					
<i>Bétula</i>	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500rpm/5.5kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg
N.º leituras (min)	24	27	111	23	23
Média (W)	411,8	442,0	477,7	513,4	554,6
DPA (W)	26,6	27,8	27,5	27,0	45,9
CV (%)	6,5%	6,3%	5,8%	5,3%	8,3%
LC 5% (W)	10,6	10,5	5,1	11,0	19,2
LC 5% (%)	2,6%	2,4%	1,1%	2,1%	3,5%

Tabela 2-8 Potência total consumida na refinação (bétula).

Análise de confiança da potência líquida consumida na refinação (W)					
<i>Bétula</i>	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500RPM/5.5Kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg
Média (W)	95,8	125,9	116,3	134,7	175,9
DPA (W)	25,9	54,3	26,4	26,9	32,0
CV (%)	27,1%	43,1%	22,7%	20,0%	18,2%
LC 5% (W)	11,8	23,6	7,8	12,6	14,8
LC 5% (%)	12,3%	18,7%	6,7%	9,4%	8,4%
LC 10%	4,8	6,9	1,9	5,2	6,1
LC 10% (%)	5,0%	5,5%	1,7%	3,9%	3,5%

Tabela 2-9 Potência líquida consumida na refinação (bétula).

Para a bétula verifica-se que:

- Os limites de confiança a uma significância de 5% representam geralmente menos de 2% do valor médio nos casos da potência de consumida na circulação de pasta e da potência total.
- Os limites de confiança da potência líquida encontram-se entre 6,7% e os 18,7%, que se situam na ordem dos valores anteriores do pinho silvestre e da bétula.

Em conclusão, salientamos que a precisão do valor da potência líquida consumida é sensivelmente da mesma ordem de grandeza para as diferentes pastas. Esta precisão num equipamento de laboratório é relativamente boa comparativamente aos equivalentes industriais; em favor daqueles joga um factor de dimensionamento consideravelmente mais elevado.

2.1.3. Medição do entreferro

O valor do entreferro foi obtido através da medida da posição do braço da alavanca por um transdutor LVDT Sensorex com uma ligação a uma carta de saída RS232C da série Kosmos e de um software de aquisição de sinal.

A imagem do LVDT já instalado no braço da alavanca do Valley pode ser vista na Figura 2-7.

A incerteza da medida do LVDT indicada pelo fornecedor é de $\pm 1\mu\text{m}$ a uma temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$. A sensibilidade do sinal analógico de saída calculada

pelo controlo de qualidade final da Sensorex é 1,003 V DC/mm, com uma linearidade de $\pm 0,23\%$.

O software de aquisição do sinal foi desenvolvido especificamente para o assunto por Pedro Araújo (docente do Departamento de Informática, Universidade da Beira Interior). Nesse software é possível estabelecer a frequência de registo dos valores de leitura, tendo-se estabelecido para os ensaios efectuados o valor de 10 leituras/s.

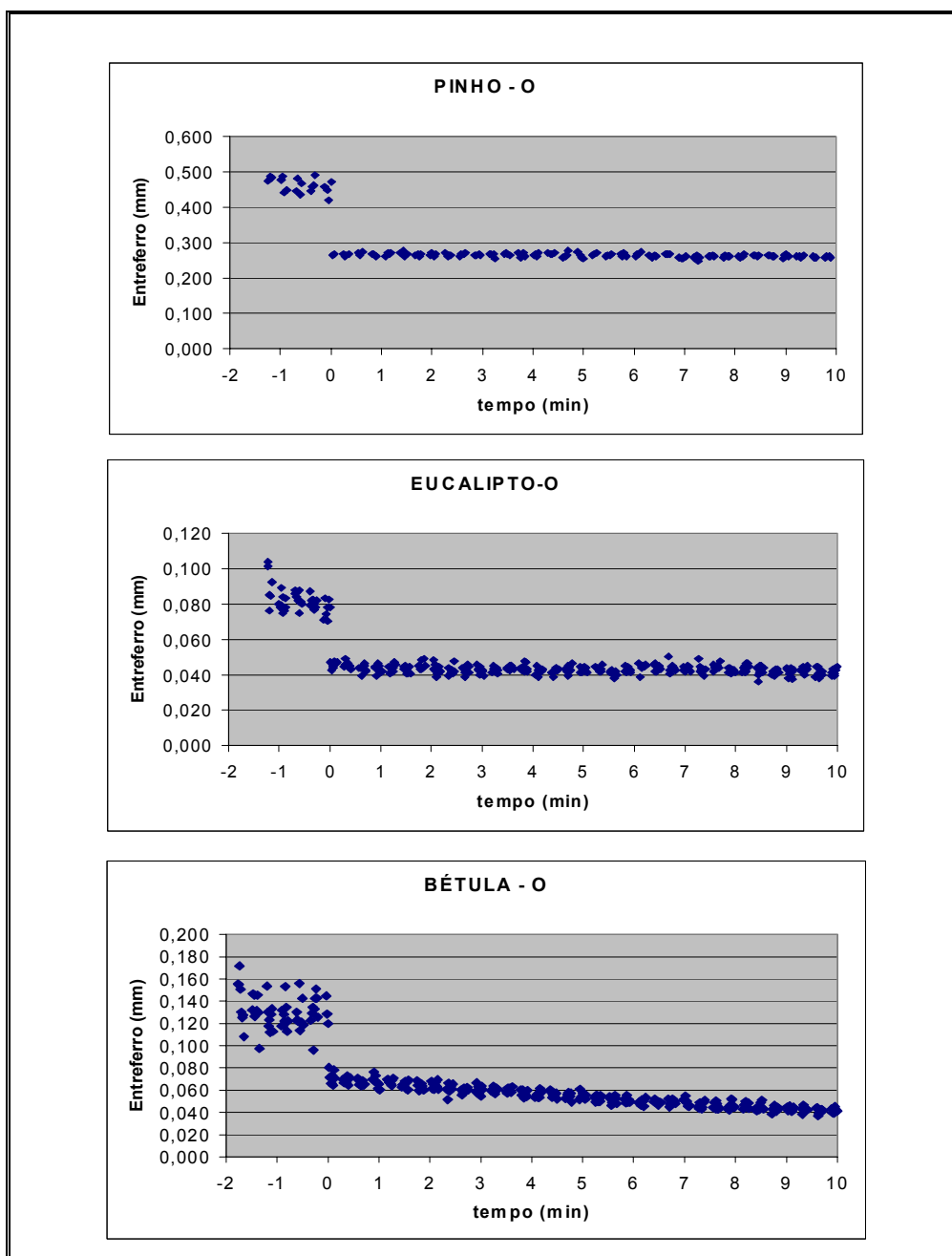


Figura 2-7 Transdutor LVDT.

Foi desenvolvido um método de calibração do LVDT para estabelecer uma relação entre o valor de leitura do LVDT e o valor do entreferro conforme anteriormente definido. A descrição do método desenvolvido e das respectivas curvas de calibração encontram-se no Anexo 4 – Curva de calibração do LVDT.

Os Gráficos 2-4 representam a evolução do entreferro para as três matérias-primas. Neles está representado o entreferro sem carga antes do início da refinação, durante o período de homogeneização da pasta a 500rpm; no início da contagem do tempo representam-se os dez minutos iniciais da refinação nas condições padrão

(carga de 5,5kg e velocidade de rotação de 500rpm). Estes gráficos tornam evidente a maior dispersão de valores do entreferro na ausência de carga, como resultado da acção do rotor. Ressalta ainda a natural redução do entreferro aquando da aplicação da carga no início da refinação.



Gráficos 2-4 Entreferro antes e nos minutos iniciais da refinação.

2.2. Descrição hidromecânica da refinação

Neste ponto vai-se apresentar os princípios e as fórmulas utilizadas para fazer uma descrição hidromecânica do processo de refinação. Calculam-se assim as forças médias normal e tangencial, a viscosidade aparente da pasta e a carga específica de aresta.

2.2.1. Cálculo da Energia Específica de Refinação e do SEL

Um conceito importante na análise da refinação é o da potência líquida de refinação P_L (W), que é dada pela fórmula:

$$P_L = P_t - P_v \quad \text{Equação 2-1}$$

em que P_t (W) é a potência total da refinação e P_v (W) é a potência em vazio (potência consumida na circulação da pasta com o entreferro totalmente aberto, com a mesma velocidade de rotação que na refinação em causa).

A energia específica de refinação EER (J/kg) no refinador Valley é dada pela fórmula:

$$EER = \frac{P_L * t}{m_f} \quad \text{Equação 2-2}$$

em que t (s) é o tempo de refinação, e m_f (kg) é a massa seca da fibra a ser refinada. Normalmente o valor da EER é expresso em KWh/t , pelo que para o caso das refinações efectuadas temos a equação:

$$EER = \frac{P_L * \left(\frac{t}{3600}\right)}{m_f} \quad \text{Equação 2-3}$$

sendo $m_f = 0,360$ kg.

A velocidade de corte L_s (ms^{-1}) é dada pelo produto

$$L_s = Z_r * Z_s * l * \dot{N} \quad \text{Equação 2-4}$$

em que Z_r é o número de barras do rotor, Z_s é o número de barras do estator e l (m) é o comprimento médio das barras do estator e do rotor e \dot{N} (s^{-1}) é a

velocidade de rotação do rotor. Para o caso do Valley temos que Z_r é 32, Z_s é 7 e l tem o valor de 0,1524 m.

A eficiência energética η é por sua vez definida como sendo a razão entre a potência líquida de refinação P_L e a potência total P_t consumida pelo refinador Valley. De forma concisa, a eficiência energética da refinação é dada pela equação:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \quad \text{Equação 2-5}$$

Finalmente, a carga específica de aresta SEL¹⁶ (J/m) é dada pela equação

$$SEL = \frac{P_L}{L_s} \quad \text{Equação 2-6}$$

Esta variável pretende representar a intensidade da refinação, atribuindo a energia líquida da refinação ao cruzamento entre as arestas do rotor e do estator.

2.2.2. Cálculo das forças e das tensões médias

A Figura 2-8 esquematiza a força média normal \vec{F}_n e a força média tangencial \vec{F}_t , desenvolvidas pelo rotor sobre o estator. O rotor passa a uma velocidade \vec{v} a uma distância e do estator, que corresponde ao entreferro. Reações idênticas de sentido contrário são desenvolvidas pelo estator sobre o rotor, representadas por \vec{R}_n e \vec{R}_t .

A força normal média exercida no entreferro é calculada utilizando o princípio da igualdade dos momentos das forças em torno do eixo de apoio de uma alavanca em equilíbrio:

$$F_n = m * g * \left(\frac{T}{U} \right) \quad \text{Equação 2-7}$$

em que F_n (N) é a força no entreferro, m (N) é a massa colocada na alavanca, g (ms^{-2}) é a aceleração da gravidade e T/U é a razão de comprimento entre os braços da alavanca do Valley (veja-se a Figura 2-2), que corresponde à razão de 17,5 para 9.

¹⁶ SEL: Specific Edge Load.

A tensão normal média τ_n (N/m^2) no entreferro é calculada pela fórmula

$$\tau_n = \frac{F_n}{A_c} \quad \text{Equação 2-8}$$

em que A_c (m^2) é a área sobreposta rotor-estator em m^2 , assumindo um valor de $0,0010195 m^2$ (veja-se o Anexo 1 – Determinação da área sobreposta rotor-estator).

O cálculo da força tangencial média é feito recorrendo à fórmula do trabalho realizado por uma força tangencial sobre um cilindro em rotação:

$$dw = F_t * ds = F_t * r * d\alpha \quad \text{Equação 2-9}$$

em que dw (W) é o trabalho desenvolvido pela força tangencial F_t (N) ao percorrer a distância ds (m) sobre o lado do cilindro, equivalente ao produto do raio r (m) do cilindro pelo ângulo $d\alpha$ (rad) percorrido.

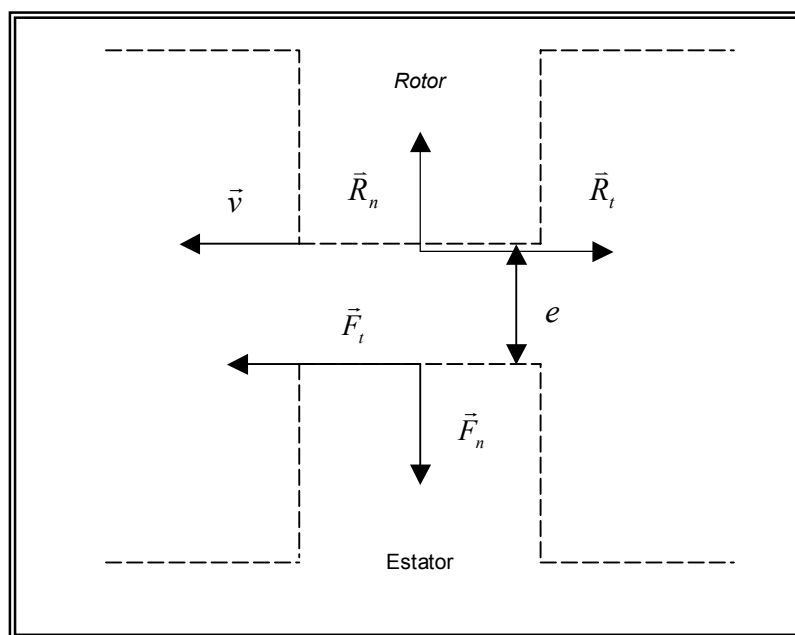


Figura 2-8 Forças exercidas no entreferro.

Para o cálculo da força tangencial média F_t (N) utiliza-se a fórmula:

$$F_t = \frac{P_L}{2 * \pi * r * \dot{N}} \quad \text{Equação 2-10}$$

em que \dot{N} (s^{-1}) é velocidade de rotação e r (m) é o raio do rotor.

A tensão tangencial média τ_t (N/m^2) no entreferro é calculada pela fórmula

$$\tau_t = \frac{F_t}{A_c} \quad \text{Equação 2-11}$$

O coeficiente de fricção f é dado pela razão entre a força tangencial e a força normal anteriormente calculadas:

$$f = \frac{F_t}{F_n} \quad \text{Equação 2-12}$$

2.2.3. Cálculo da viscosidade aparente da pasta

O cálculo da viscosidade μ para um fluido em escoamento laminar é dado pela fórmula

$$\tau_t = \mu * \frac{dv}{dz} \quad \text{Equação 2-13}$$

sendo $\frac{dv}{dz}$ (s^{-1}) o gradiente de velocidade no fluido, também representado como G .

Utilizando esta fórmula para o caso de um fluido não newtoniano (a suspensão de pasta), pode-se relacionar a tensão tangencial média τ_t (N/m^2) e a viscosidade aparente μ_{ap} ($Pa.s$) no entreferro e (m) do Valley pela fórmula:

$$\tau_t = \mu_{ap} * \frac{\Delta v_e}{e} \quad \text{Equação 2-14}$$

sendo Δv_e (ms^{-1}) o diferencial de velocidade entre a superfície da lâmina do rotor e a superfície da lâmina do estator.

Assim, pode-se calcular a viscosidade aparente da suspensão fibrosa ao longo da refinação pela fórmula:

$$\mu_{ap} = \frac{\tau_t}{\left(\frac{\Delta v_e}{e}\right)} = \frac{\tau_t}{\left(\frac{2\pi \cdot \dot{N} \cdot r}{e}\right)} = \frac{\tau_t}{G}$$

Equação 2-15

Empregando esta fórmula para calcular o valor “instantâneo” da viscosidade aparente da pasta, pode-se verificar que esta não é constante.

2.2.4. Cálculo do número de Reynolds.

O número de Reynolds permite determinar se o regime de um determinado fluxo é laminar ou turbulento. Para isso torna-se necessário estimar esse valor para as condições mais desfavoráveis, de modo a verificar se o pressuposto de escoamento laminar no cálculo das forças viscosas é efectivamente válido.

$$Re = \frac{\rho * v * d_h}{\mu}$$

Equação 2-16

em que ρ (kg/m^3) é a massa volúmica, v (ms^{-1}) é a velocidade do fluido, d_h (m) é o diâmetro hidráulico e μ ($Pa.s$) é a viscosidade.

O diâmetro hidráulico é definido pela fórmula:

$$d_h = \frac{4 * A_f}{P_m}$$

Equação 2-17

em que A_f (m^2) é a área de fluxo do fluido e P_m (m) é o perímetro molhado da conduta.

Para o caso do entreferro no Valley temos que:

$$d_h = \frac{4 * e * l}{2 * (l + e)} = \frac{2 * e}{\left(1 + \frac{e}{l}\right)} \approx 2 * e$$

Equação 2-18

Para os ensaios efectuados o valor de e nunca foi superior a $300\mu m$, pelo que d_h nunca foi superior a $6,0.10^{-4} m$.

Quanto à massa volúmica ρ , ela depende da hidratação das fibras; no entanto, como forma de evitar dúvidas, assumiu-se o valor teórico máximo correspondente à celulose seca ($1540 kg/m^3$).

O valor da velocidade depende do fluxo da suspensão no entreferro, e logo do grau de refinação. Adoptou-se como valor limite o valor máximo de $6,09 \text{ ms}^{-1}$ (velocidade da superfície das lâminas do rotor a 600rpm).

No que respeita ao valor para a viscosidade μ , utilizou-se o valor mínimo obtido nos ensaios realizados. Este foi superior a $0,100 \text{ Pa.s}$.

Assim obteve-se como valor máximo para o número de Reynolds nos ensaios realizados o valor de 56, que é significativamente inferior a 2000 (valor de início do escoamento turbulento). Temos assim um escoamento laminar no entreferro, e a metodologia de estimativa das forças envolvidas é válida.

3. Refinação de Pastas

3.1. Apresentação das matérias-primas

As matérias-primas seleccionadas para este estudo foram pastas ao sulfato branqueadas de uma espécie resinosa e de duas espécies folhosas. As espécies escolhidas foram as seguintes:

1. *Pinus sylvestris* fornecido pela Soporcel, tendo como origem o grupo Kymmene¹⁷.
2. *Eucalyptus globulus* produzido pela Portucel.
3. *Betula verrucosa* fornecida pelo centro de investigação Raiz.

Tratam-se de pastas comercializadas, estando condicionadas em fardos com um teor de humidade nominal de 12%.

Cada uma destas matérias-primas é identificada neste trabalho como pinho silvestre, eucalipto e bétula. Com esta selecção pretendeu-se abranger fibras com diferentes comprimentos e diferentes massas lineares. Algumas propriedades morfológicas e físicas das fibras estão sumariadas na Tabela 3-1. Os limites de confiança destes valores são posteriormente analisados neste trabalho.

Pasta	Comprimento da Fibra ¹⁸ L_a (mm)	Largura da Fibra D (μm)	L_a/D	Massa Linear (mg/m)	Índice de Flexibilidade ¹⁹
Pinho Silvestre	1,16	31	37	0,159	50,3
Eucalipto	0,67	18	37	0,068	47,5
Bétula	0,94	23	40	0,103	46,8

Tabela 3-1 Propriedades morfológicas das fibras das pastas em estudo.

Alguns pontos interessantes podem ser observados quando se comparam as diferentes propriedades morfológicas:

¹⁷ O grupo Kymmene é um grupo finlandês da fileira florestal.

¹⁸ Trata-se do comprimento aritmético da fibra.

¹⁹ As medidas do índice de flexibilidade foram amavelmente realizadas pela sociedade CyberFlex, cujo presidente é Thierry Cresson. Veja-se a equação 3-2.

1. A bétula tem um comprimento aritmético da fibra próximo do valor intermédio entre o pinho silvestre e o eucalipto (esse valor intermédio é 0,91 mm, sendo o valor correspondente para a bétula 0,94mm).
2. A mesma observação pode ser feita em relação à largura da fibra. A largura média de 23 μ m da fibra da bétula está próxima do valor intermédio entre o pinho silvestre e o eucalipto (que é 25 μ m).
3. As fibras do pinho silvestre são geometricamente semelhantes²⁰ às fibras do eucalipto no que concerne à relação entre o comprimento aritmético e a largura média das fibras. Isto porque têm a mesma razão de aspecto L_a/D . A fibra da bétula é proporcionalmente mais comprida, já que apresenta uma razão de aspecto cerca de 9% superior aos valores do pinho silvestre e do eucalipto.
4. A massa linear da bétula encontra-se igualmente próximo do valor intermédio entre o pinho e o eucalipto (0,114 mg/m).
5. Os índices de flexibilidade em estado húmido da bétula e do eucalipto apresentam valores próximos. No entanto, o valor da flexibilidade do eucalipto é ligeiramente superior, provavelmente em virtude da sua menor massa linear. O valor da flexibilidade do pinho silvestre é significativamente superior aos valores do eucalipto e da bétula. É de salientar que estes valores vão ao encontro aos publicados por Paavilainen e Luner (1995), que estudaram a relação entre a flexibilidade das fibras e a massa linear em folhosas e resinosas. Possivelmente a forma da secção da fibra e a espessura da parede poderão explicar estas diferenças entre as matérias-primas.

Apresentam-se seguidamente as curvas de refinação nas condições padrão (carga de 5,5 kg e velocidade de rotação de 500rpm) para as pastas em estudo (vejam-se o Gráfico 3-1, o Gráfico 3-2 e o Gráfico 3-3). Nestes gráficos tem-se o grau de refinação em unidades Schopper–Riegler (°SR), tendo os ensaios sido efectuados de acordo com a norma ISO 5267-1:1979.

²⁰ Transformação de semelhança geométrica: transformação pontual que conserva os ângulos e em que os segmentos correspondentes estão numa razão constante, chamada razão semelhança.

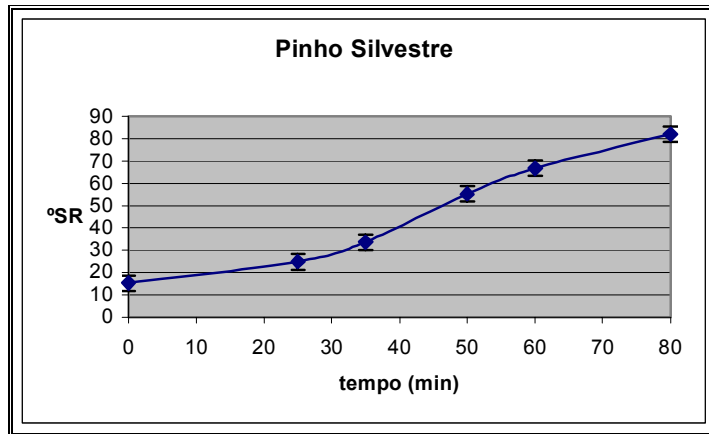


Gráfico 3-1 Curva de refinação padrão do pinho silvestre.

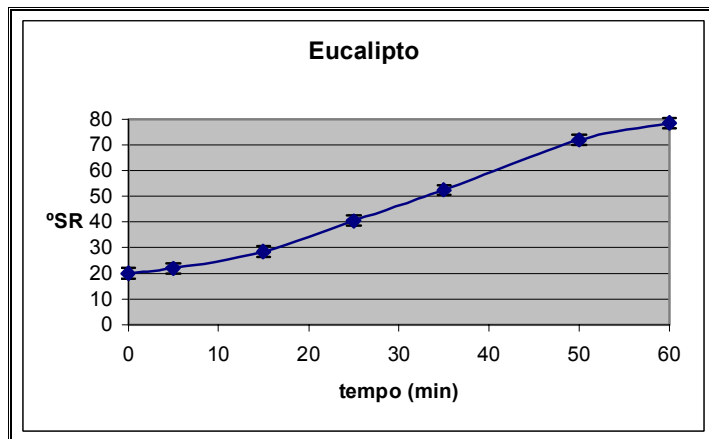


Gráfico 3-2 Curva de refinação padrão do eucalipto.

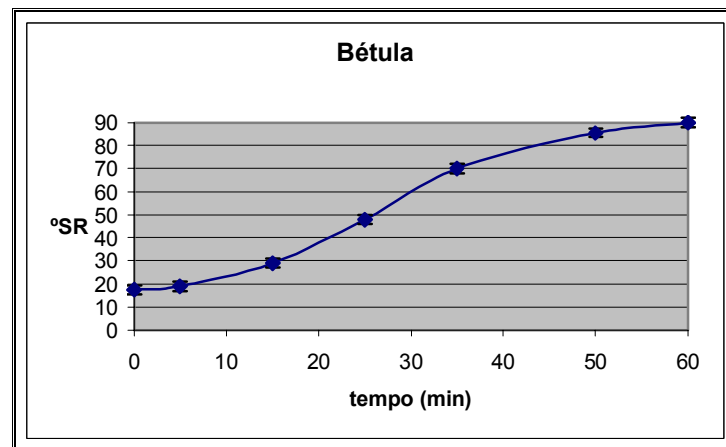


Gráfico 3-3 Curva de refinação padrão da bétula.

Apresentam-se ainda nos gráficos os respectivos intervalos de confiança a 5% de significância; estes são respectivamente $\pm 3,5^\circ\text{SR}$ para o pinho silvestre e $\pm 2,0^\circ\text{SR}$ para o eucalipto e a bétula.

Da análise dos gráficos pode-se constatar, conforme o esperado, uma evolução mais lenta do pinho silvestre em comparação com o eucalipto e a bétula. A bétula por sua vez é a pasta que apresenta a evolução mais rápida.

Pode-se verificar assim, que o tempo para se atingir um grau de refinação de 60°SR excede os 50 minutos para o pinho silvestre, é de cerca de 40 minutos para o eucalipto e é cerca de 30 minutos para a bétula.

3.2. Medição das propriedades morfológicas das fibras

A medição das propriedades morfológicas é feita pelo analisador de fibras Morfi, desenvolvido pelo *Centre Technique du Papier*²¹. O sistema é composto por uma célula de medida com acessórios diversos que estão ligados a um conjunto informático tipo PC. A composição básica do equipamento pode ser observada na Figura 3-1.

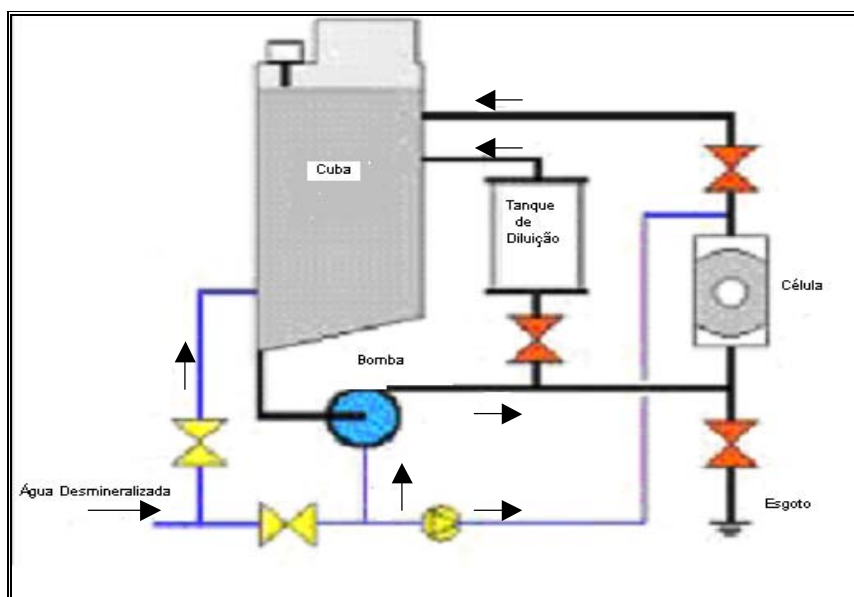


Figura 3-1 Componentes do Analisador Morfi (Fonte: TechPap).

²¹ CTP (Centre Technique du Papier): centro tecnológico do papel, em Grenoble, França.

A suspensão de pasta é alimentada a uma concentração de 30 mg/l por um sistema hidráulico (bomba, cuba, electroválvulas) controlado pelo PC, passando pela célula de medida associada a uma objectiva de amplificação da imagem e a uma câmara de vídeo CCD²² com uma resolução de 10 µm. A cuba tem como função o armazenamento e homogeneização da suspensão para ser alimentação à célula, o tanque de diluição é utilizado para a eliminação de bolhas de ar antes do ensaio, por circulação em circuito fechado com a cuba de alimentação da suspensão.

Um algoritmo que corre em ambiente Windows NT efectua o tratamento matemático dos níveis de cinzento (Tessadro, 1994, p.38-49), obtendo-se uma resolução de 4 µm na imagem amplificada.

A célula de medida foi concebida de forma a orientar as fibras e a provocar a sua desfloculação, sendo iluminado por flaches com uma determinada frequência.

O Morfi efectua o seguinte tratamento das imagens:

1. Detecção dos pixels dos objectos. Para isso possui um algoritmo de aquisição dos sinais em que efectua simultaneamente a filtração e a conversão da imagem em código binário. A imagem é dividida em quatro níveis de cinzento, de acordo com a luminância dos pixels.
2. Reagrupamento dos pixels em objectos.
3. Tratamento prévio da imagem.
4. Construção do esqueleto dos objectos, que consiste na construção de linhas que passam pelo seu interior.
5. Percorrer das fibras cortadas, dividindo-se as fibras em segmentos. Para cada segmento calcula-se a largura, a curvatura local, o declive das tangentes nas extremidades e as dobras.
6. Separação das fibras justapostas e reconstituição das fibras individualmente.
7. Obtenção dos valores para as propriedades morfológicas e tratamento estatístico dos valores.

²² CCD (charge-coupled device): um sistema de recolha de dados que consiste numa série de células semicondutoras sensíveis à luz sobre uma placa de silício, que funciona como um sensor óptico e que acumula os dados e os transfere para um amplificador e um detector. É utilizado essencialmente em sistemas de imagem.

O algoritmo distingue as fibras dos elementos finos de acordo com os seguintes critérios dimensionais:

$$200 \mu\text{m} < \text{Comprimento do objecto} < 10 \text{ mm}$$

$$5 \mu\text{m} < \text{Largura do objecto} < 75 \mu\text{m}$$

Os critérios para identificação dos finos são os seguintes:

$$\text{Comprimento do objecto} < 200 \mu\text{m, ou}$$

$$\text{Largura do objecto} < 5 \mu\text{m}$$

As propriedades morfológicas medidas são as seguintes:

- Número de fibras por grama (g^{-1}).
- Comprimento aritmético das fibras e comprimento ponderado em comprimento (mm).
- Largura das fibras (μm).
- Massa linear (mg/m).
- Dobras das fibras (ângulo e número).
- Curvatura das fibras.
- Teor em macrofibrilas (%).
- Percentagem em superfície dos elementos finos (%).
- Percentagem em comprimento dos elementos finos (%).

Obtém-se igualmente a distribuição entre seis e dez classes para o comprimento, a largura, as dobras e a curvatura das fibras.

Comprimento das Fibras

Os comprimentos das fibras são calculados após a construção do esqueleto da fibra ao se percorrer cada segmento. Depois da separação das fibras procede-se à reconstituição dos objectos, obtendo-se então o comprimento de cada fibra.

Diversos tipos de comprimento estão disponíveis, tais como o comprimento médio aritmético L_a e o comprimento médio ponderado em comprimento L_{pl} :

$$\text{Comprimento médio aritmético} \quad L_a = \sum L_i / N \quad 1 < i < N$$

$$\text{Comprimento médio ponderado em comprimento} \quad L_{pl} = \sum (L_i * L_i) / \sum L_i$$

sendo N o número de fibras e L_i o comprimento de cada fibra.

O Morfi procede a uma correção estatística nos comprimentos. Isto deve-se ao facto de as fibras mais compridas terem mais probabilidades de serem cortadas na imagem, por ultrapassarem os respectivos limites. Este erro foi quantificado por cálculo e testado experimentalmente. Desta forma o algoritmo calcula a probabilidade de uma dada fibra ser cortada do campo de visão da câmara, sendo essa probabilidade função do seu comprimento. O resultado final entrará em conta com essa probabilidade.

Largura das Fibras

As larguras são calculadas após a construção dos esqueletos, em simultâneo com o comprimento. Obtém-se assim um valor médio de largura muito preciso, já que ele é calculado em todos os pontos do esqueleto.

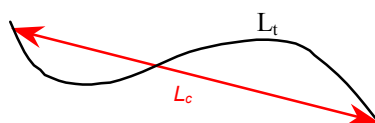
As dobras são em geral zonas de início de ruptura. São identificados como sendo pontos em que há uma mudança brusca de direcção quando se percorre a fibra.

Massa linear

A massa linear é a massa por unidade de comprimento, que é calculada pela razão entre a massa da suspensão observada e o comprimento acumulado correspondente. A massa da suspensão é calculada através da contagem do número de imagens obtidas, do conhecimento da concentração mássica da suspensão fibrosa e do volume de suspensão observada em cada imagem. O comprimento utilizado entra em conta com o comprimento total das fibras, após a correção estatística anteriormente referida.

Dobras e Curvatura da Fibra

A curvatura é determinada como a razão entre o comprimento da corda L_c entre as extremidades da fibra e comprimento total da fibra L_t , sendo a curvatura dada por $C(\%)=100*(1-L_c/L_t)$.



Fibrilas

O Morfi fornece-nos a percentagem de fibrilas em comprimento, em relação à soma do comprimento total de fibrilas e fibras.

Quebras

A percentagem de extremidades de fibras cortadas é determinada pela razão entre número de extremidades cortadas e o número total de extremidades (que é igual ao dobro do número de fibras analisadas). A forma da extremidade do esqueleto da fibra determina se ela é contabilizada como estando quebrada.

Elementos Finos

São considerados elementos finos, todos aqueles objectos com um comprimento inferior ao comprimento mínimo das fibras ou uma largura inferior à largura mínima das fibras. A sua proporção é calculada em superfície ou em comprimento, relativo ao total dos objectos detectados.

Análise de Confiança

A Tabela 3-2 reúne os valores dos limites de confiança a 5% de todas as propriedades morfológicas medidas para o Pinho, o Eucalipto e a Bétula. Apresenta-se igualmente o valor da razão, expressa como uma percentagem, entre o limite de confiança a 5% e a média.

O Anexo 6 – Análise de Confiança ao Morfi, apresenta uma análise estatística mais detalhada. Foram realizados 5 ensaios para cada amostra analisada. Cada ensaio efectuou uma contagem de 5000 fibras. Pode-se constatar que os valores obtidos apresentam uma boa reprodutibilidade, já que os limites de confiança são na maior parte dos casos inferiores a 2%. As maiores variabilidades encontram-se no teor de microfibrilas (entre 3,8% e 5,1%) e o teor de finos em área (entre 4,2% e 5,8%).

Matéria-prima	Pinho Silvestre		Eucalipto		Bétula	
	LC 5%	LC 5% (%)	LC 5%	LC 5% (%)	LC 5%	LC 5% (%)
Limite de confiança	LC 5%	LC 5% (%)	LC 5%	LC 5% (%)	LC 5%	LC 5% (%)
N.º de Fibras ($10^6 \cdot g^{-1}$)	0,2	3,6%	0,4	1,8%	0,3	2,2%
L_a (mm)	0,02	1,8%	0,004	0,6%	0,006	0,8%
L_{pl} (mm)	0,03	1,8%	0,005	0,6%	0,010	1,1%
Largura (μm)	0,3	0,9%	0,1	0,7%	0,2	0,7%
Massa Linear (mg/m)	0,004	2,8%	0,001	1,9%	0,006	6,2%
Ângulo das dobras ($^\circ$)	0,7	0,5%	0,5	0,4%	0,6	0,4%
Dobras (%)	0,8	2,5%	0,7	2,1%	0,7	1,8%
Curvatura	0,2	2,1%	0,1	1,4%	0,2	1,8%
Macrofibrilas (%)	0,03	4,0%	0,03	5,1%	0,03	3,8%
Pontas Quebradas (%)	1,3	2,8%	0,6	3,1%	0,9	3,1%
Finos em Comp. (%)	1,0	3,7%	0,5	1,9%	0,8	2,4%
Finos em Área (%)	0,4	10,3%	0,4	4,2%	0,4	5,8%

Tabela 3-2 Análise de confiança às propriedades morfológicas.

O aparelho foi calibrado pela empresa fornecedora do equipamento, utilizando uma fibra sintética padrão. Os parâmetros de calibração estão expressos na seguinte tabela:

<i>Medida</i>	<i>Valores Alvo</i>	<i>Tolerância</i>
Comprimento L_{pl}	1,007 mm	+/- 0,015 mm
Largura	36,9 μm	+/- 0,5 μm
Massa Linear	0,515 mg/m	+/- 0,04 mg/m

Tabela 3-3 Valores de calibração do Morfi.

Efectuaram-se periodicamente ensaios de verificação da calibração com a fibra sintética. Verificou-se que os valores alvos se mantiveram estáveis.

3.3. Medição da flexibilidade das fibras

A flexibilidade das fibras determina a sua conformabilidade, permitindo um maior contacto durante a formação da folha. Tal resulta, num aumento da área relativa de ligação entre as fibras. Paavilainen e Luner (1995) encontraram uma relação linear entre a massa volúmica do papel (que está relacionada com a área relativa de ligação) e a flexibilidade da fibra para o pinho escocês.

Os dois principais métodos implementados para medir a flexibilidade da fibra são o método hidrodinâmico de Tam Doo e Kerekes (1981) e o método de Mohlin-Steadman.

O CyberFlex, usado no presente trabalho, baseia-se no método de Mohlin-Steadman que simula a deformação mecânica e as ligações químicas que as fibras estão sujeitas durante a formação da folha (Steadman e Luner, 1995). As fibras em estado húmido são depositadas sobre um fio metálico de diâmetro calibrado depositado sobre uma placa de vidro. A fibra é teoricamente tratada como uma viga elástica com um suporte simples e carga uniforme (veja-se o esquema na Figura 3-2).

O aparelho CyberFlex é composto por um analisador de imagens que determina a flexibilidade da fibra em estado húmido, assim como a sua conformabilidade e área relativa de ligação RBA²³. Trata-se de um aparelho totalmente automático, sendo composto por um preparador de amostras e um aparelho de medida. O preparador de amostras deposita as fibras sobre o suporte, que é constituído por uma placa de vidro (recoberta de fios metálicos calibrados quando se tratam de amostras para a medição de flexibilidade). O aparelho de medida é constituído por uma lente de microscópio óptico ligado a uma câmara CCD que analisa as imagens e determina as diferentes características., utilizando um algoritmo de processamento de imagem. O valor da flexibilidade é então calculado e armazenado num histograma, até que um número suficiente de fibras sejam processadas para constituir uma amostra válida. A medida faz-se a um número de fibras entre 100 e 1000, dependendo da homogeneidade da amostra e o comprimento médio das fibras.

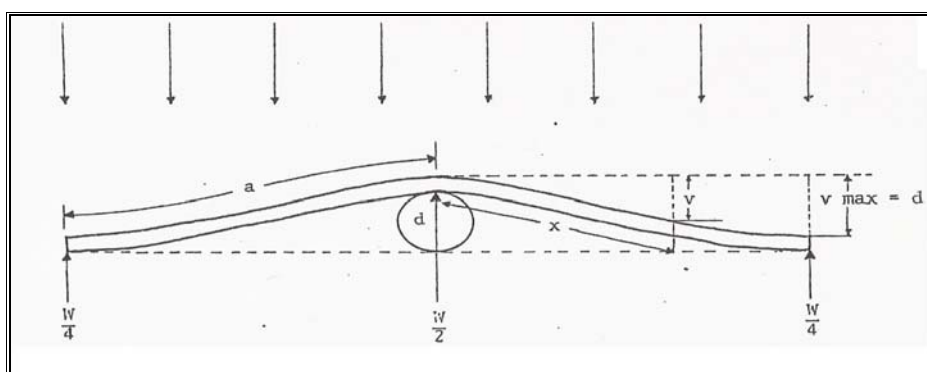


Figura 3-2 A fibra como uma viga elástica (Fonte: Steadman e Luner, 1985).

²³ RBA: relative bonded area.

O comprimento da fibra que não está em contacto com a placa de vidro é utilizada para calcular a flexibilidade em estado húmido WFF ($N^{-1}.m^{-2}$) de acordo com a fórmula:

$$WFF = \frac{72.D}{P.w.S^4} \quad \text{Equação 3-1}$$

em que D (m) é o diâmetro do fio, P (Pa) é pressão de prensagem, w (m) é a largura projectada da fibra e S (m) é a distância entre os pontos de contacto da fibra com a placa de vidro.

O índice de flexibilidade é um índice arbitrário semelhante à escala térmica em graus Celsius. O valor zero corresponde a $10^{9,5} N^{-1}m^{-2}$. O valor 100 corresponde a $10^{13,5} N^{-1}m^{-2}$. Estes valores foram escolhidos após 10 anos de testes em todos os tipos de pasta de forma a cobrir toda a gama de valores²⁴. Este índice é logarítmico e é calculado de acordo com a fórmula:

$$WFF_i = 100 * \frac{(\log_{10} WFF - \log_{10} 10^{9,5})}{(\log_{10} 10^{13,5} - \log_{10} 10^{9,5})} \quad \text{Equação 3-2}$$

Os trabalhos de Luner (1986) e Steadman e Luner (1995) mostraram uma boa correlação linear entre o logaritmo da flexibilidade WFF e o logaritmo do grau de refinação (expresso em revoluções PFI²⁵).

Cláudio da Silva, investigador da Aracruz Celulose²⁶, propôs em 1981 um factor de conformabilidade CF dado pela fórmula:

$$CF = S \times N \quad \text{Equação 3-3}$$

em que S ($N.m^2$) é a rigidez da fibra (que é dada pelo inverso da flexibilidade WFF) e N (g^{-1}) é o número de fibras por grama.

²⁴ Esta informação foi fornecida directamente por Thierry Cresson, presidente da firma CyberFlex e que concebeu e desenvolveu o equipamento de medição de flexibilidade em húmido.

²⁵ Número de revoluções do refinador laboratorial PFI.

²⁶ Aracruz Celulose: empresa brasileira do ramo da celulose e do papel.

A área relativa de ligação pode por sua vez ser determinada pela razão entre a área de contacto óptico entre a fibra depositada e a placa de vidro e a área total projectada da fibra (método de Clarke). As fibras neste ensaio estão depositadas directamente sobre as placas de vidro.

Os limites de confiança a 5% para os ensaios de flexibilidade efectuados foram de 2,6% da flexibilidade média de cada ensaio para o pinho silvestre e 2,8% para o eucalipto e a bétula. O número médio de fibras analisadas em cada ensaio foi de 350. Uma análise estatística mais detalhada encontra-se no Anexo 7 – Análise de confiança ao CyberFlex.

3.4. Plano de Experiências

3.4.1. Metodologia e ensaios

A definição e execução do plano de experiências estabelecido para cada matéria-prima (pinho silvestre, eucalipto e bétula) englobaram as seguintes etapas:

1. Determinação experimental da curva de refinação nas condições padrão (carga de 5,5 kg e velocidade de rotação de 500rpm).
2. Estabelecimento dos três níveis de refinação em °SR definidos como alvos a atingir nas condições de refinação padrão, que se denominaram O₁, O₂ e O₃.
3. Cálculo dos tempos para se atingirem estes graus de refinação.
4. Cálculo da energia específica de refinação EER consumida em cada um destes pontos (E₁, E₂ e E₃), tendo como base os valores obtidos para a potência líquida consumida nas condições padrão.
5. Cálculo dos tempos de refinação requeridos para aplicar as mesmas energias específicas de refinação E₁, E₂ e E₃ sob cada uma das quatro condições de refinação distintas (A, B, C e D). Estes valores foram obtidos com base nos ensaios preliminares da potência líquida consumida nas diferentes condições de operação. Estas quatro condições estabelecem todas as combinações com dois níveis de carga (4,5 kg e 5,5 kg) e dois níveis de velocidade de rotação (400rpm e 600rpm). O conjunto das condições de refinação estão representadas na

Figura 3-3. Estes valores foram seleccionados com base nas possibilidades do equipamento e nos objectivos do trabalho.

- Realização das cinco refinações (respectivamente das condições O, A, B, C e D) para cada nível de energia E_i de forma aleatória. Minimizou-se assim o efeito da variação do desgaste das lâminas do refinador na análise dos resultados das refinações em cada nível. Executaram-se inicialmente as refinações E_1 , depois as de E_2 e finalmente as de E_3 . Efectuaram-se igualmente todos os procedimentos de desintegração e homogeneização para a pasta não refinada a ser estudada. Os valores da evolução do entreferro foram registados.

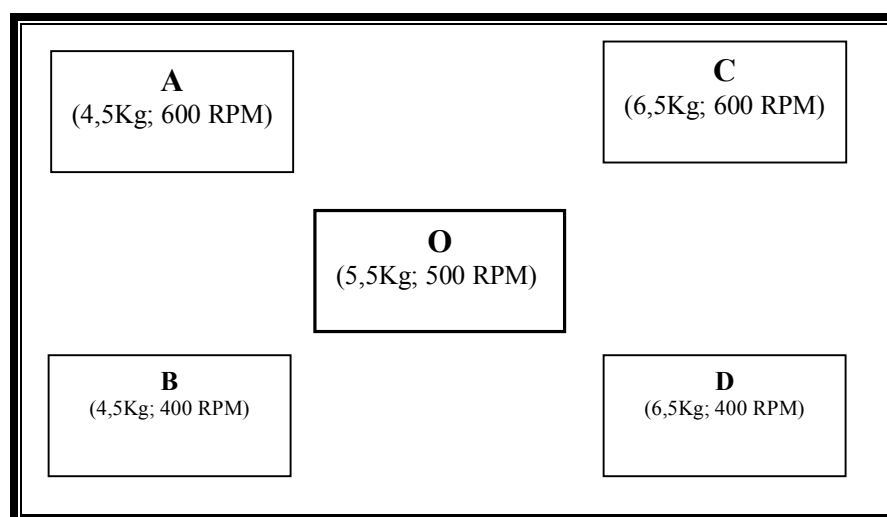


Figura 3-3 Condições de Refinação.

- Produção das folhas padrão no formador de folhas modelo SCA da *AB Lorentzen & Wettre*. Este formador obedece à norma SCAN²⁷ C 26:76. Tratam-se de folhas circulares com uma gramagem de 60 g/m², tendo uma área de 214 cm². Após a sua formação as folhas são prensadas e posteriormente colocadas em ambiente condicionado para a sua secagem.
- Realização dos ensaios relativos às propriedades da suspensão e respectivas fibras.
- Realização dos ensaios relativos às propriedades do papel.

²⁷ As normas SCAN são emitidas pelo "Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee".

Análise hidrodinâmica e mecânica do refinador.

A análise hidrodinâmica e mecânica do refinador inclui os seguintes pontos:

1. Cálculo das tensões normais e tangenciais exercidas no entreferro. Calcula-se também a carga específica de aresta.
2. Cálculo do coeficiente de fricção no entreferro.
3. Cálculo e análise da evolução da viscosidade aparente em função do tempo.
4. Cálculo e análise da evolução do entreferro e do gradiente de velocidade no entreferro.
5. Cálculo da eficiência energética do equipamento.

Propriedades da pasta

Os ensaios efectuados relativos as propriedades da fibra e da pasta foram os seguintes:

1. Propriedades morfológicas da fibra, determinadas com o analisador Morfi.
2. Grau de refinação °SR de acordo com a norma ISO 5267-1:1979.
3. Tempo de drenagem de acordo com a norma TAPPI T 221 om-93.
4. WRV²⁸ intra-fibra, como parâmetro indicador do grau de hidratação das fibras e da sua plasticidade (Silvy, Sarret et Jestin, 1964; Silvy, Romatier e Chiodi, 1968).
5. Ensaio de tracção *zero-span*²⁹ como parâmetro relacionado com a resistência intrínseca da fibra (Silvy, 1980, p.139-157; Cowan, 1991; Seth e Chan, 1999). Efectuaram-se ensaios Zero-span em húmido de acordo com a norma TAPPI T 273 pm-95, ensaios de zero-span em seco (norma TAPPI T 231 cm-96) e ensaios short-span em seco e em húmido. O aparelho utilizado foi o Z-span da *Pulmac*.

²⁸ WRV: water retention value. O WRV é a percentagem de água retida na fibra após 15 minutos de centrifugação a uma aceleração de 3000g. Veja-se a referência Silvy, Sarret e Jestin (1964), p. 61.

²⁹ Zero-span: ensaio de tracção em que a distância entre as garras é nula.

6. Teor de Finos no classificador Bauer-McNett (norma TAPPI T 233 cm-95 para classificação de fibras). Consideram-se como finos aquela fracção que passa no crivo de mesh 200.

Propriedades do Papel

Os ensaios efectuados para caracterizar o papel foram os seguintes:

1. Propriedades da estrutura do papel, sendo estas a gramagem, a espessura e a massa volúmica.
2. Propriedades de superfície e de permeabilidade. Efectuaram-se ensaios de lisura Bekk (norma TAPPI T 479) e permeabilidade ao ar Bendtsen (norma ISO 5636-5).
3. Rigidez estática (norma TAPPI T 556 pm-95), relacionada com as propriedades elásticas do papel (Levlin e Söderhjelm, 1999, p.151). Refere-se à resistência do papel quando deformado por uma carga externa.
4. Ensaio óptico. Determinou-se a opacidade, a brancura e os coeficientes de dispersão e absorção de luz. Utilizou-se para isso um espectrofotómetro Color Touch 2 da Technidyne.
5. Propriedades de resistência. Realizaram-se ensaios de resistência à tracção (norma TAPPI T 494 om-88), resistência ao rebentamento (norma TAPPI T 403 0m-91) e resistência ao rasgamento Elmendorf (norma TAPPI T 414 om-88).
6. Ensaio para avaliação da área relativa de ligação (RBA) e da energia da ligação. O método utilizado para medir a área relativa de ligação foi o método óptico, assente na teoria de Kubelka-Munk (Uesaka, 1984, p.387-388). O método utilizado para medir a energia da ligação foi o método de Nordman (Van Den Akker, 1982, p.162-163). Efectuaram-se igualmente ensaios do Scott-Bond (norma TAPPI T 833 pm-94), que mede a resistência à tensão normal em relação à superfície do papel. Esta propriedade está ligada à energia de ligação interna do papel.

Todos estes ensaios efectuaram-se em ambiente condicionado de acordo com a norma TAPPI T 402 om-93. As condições aí definidas são de uma temperatura de $23.0^{\circ}\text{C}\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de $50\%\pm 2.0\%$. O secagem e acondicionamento do papel após a sua formação e os testes no aparelho Z-span foram igualmente efectuados nestas condições.

Metodologia de obtenção de correlações e análise dos dados

Todo o planeamento de experiências foi concebido de forma a se obter uma primeira aproximação de expressões lineares que relacionem as propriedades em estudo com a carga utilizada e a velocidade de rotação, incluindo-se um factor de interacção entre estes parâmetros. As duas variáveis em estudo foram normalizadas, tendo como referência as condições padrão $0 - 5,5 \text{ kg}$ e 500 rpm . Assim a velocidade de rotação foi normalizada, obtendo-se a variável N definida pela seguinte expressão:

$$N = \frac{\Omega - 500 \text{rpm}}{100 \text{rpm}} \quad \text{Equação 3-4}$$

em que Ω é a velocidade de rotação em rpm. Por sua vez a carga foi normalizada na forma da variável L de acordo com a seguinte expressão:

$$L = \frac{\Psi - 5,5 \text{kg}}{1,0 \text{kg}} \quad \text{Equação 3-5}$$

em que Ψ é carga da refinação em kg. N e L variam no interior dos seguintes intervalos:

$$-1 \leq N \leq +1 \quad \text{Equação 3-6}$$

$$-1 \leq L \leq +1 \quad \text{Equação 3-7}$$

já que os valores testados para N e para L são 0 , $+1$ e -1 .

Para cada propriedade P_i obteve-se em cada nível de energia E_j uma expressão linear em N e L com a estrutura seguinte:

$$P_i^j = \alpha_i^j \cdot N + \beta_i^j \cdot L + \delta_i^j \cdot N \cdot L + P_0^{i,j} \quad \text{Equação 3-8}$$

em que P_i^j é a propriedade P_i em análise no nível E_j , α_i^j é o coeficiente linear de N , β_i^j é o coeficiente linear de L , δ_u^j é o parâmetro de interação e $P_0^{i,j}$ é a ordenada na origem.

Os parâmetros α_i^j , β_i^j , δ_i^j e $P_0^{i,j}$ foram posteriormente ajustados em equações função da energia específica de refinação em kWh/t (correspondente a quatro níveis energéticos, o nível de energia correspondente às pastas no instante inicial da refinação mais os três níveis de energia estudados). Dependendo dos casos, obtiveram-se para estes parâmetros equações de grau zero, de primeiro grau e de segundo grau. Em cada matéria-prima obteve-se assim uma equação global para cada propriedade que a relaciona com a velocidade de rotação normalizada N , a carga normalizada L e a energia específica de refinação em kWh/t (ou então a energia total específica consumida, já que se conhece o rendimento da máquina para cada condição de operação).

3.4.2. Plano de Experiências do Pinho

A potência específica líquida da refinação (W/kg) do pinho silvestre em função da velocidade de rotação normalizada N e da carga normalizada L é expressa pela seguinte equação:

$$PL = 93,5 \cdot N + 43,9 \cdot L - 3,5 \cdot N \cdot L + 246,7 \quad \text{Equação 3-9}$$

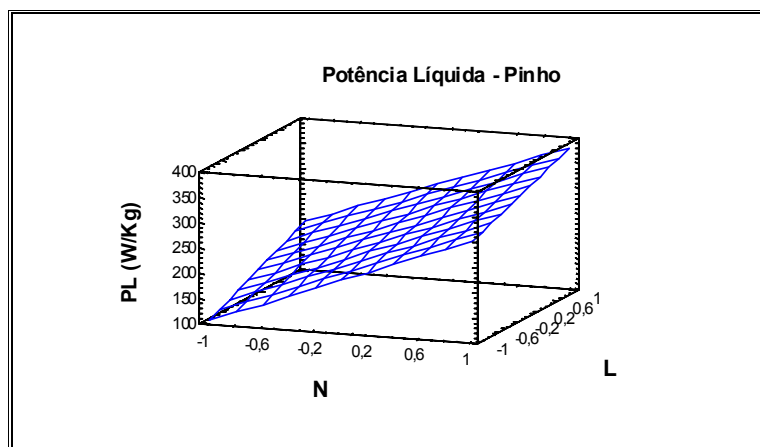


Gráfico 3-4 Potência Líquida do Pinho.

O Gráfico 3-4 representa esta equação em termos tridimensionais. Pode-se verificar que o efeito de N sobre a potência líquida é cerca do dobro do efeito de L, sendo o efeito da interacção secundário. Pode-se observar ainda que a potência líquida aumenta com N e com L, conforme seria de esperar.

A Tabela 3-4 apresenta os três graus de refinação (O_1 , O_2 e O_3) estabelecidos como meta para o ponto central O. Os valores escolhidos abrangem uma gama ampla, tendo em vista a avaliação do potencial papelero da pasta. Os tempos de refinação equivalentes a esses graus de refinação foram obtidos a partir da curva de refinação apresentados no Gráfico 3-1.

Tempo de refinação nas condições padrão (500RPM/5.5Kg)		
Grau de Refinação Alvo (°SR)		Tempo (min)
O_1	30	30,0
O_2	45	42,5
O_3	60	55,0

Tabela 3-4 Graus de refinação objectivo e tempos de refinação padrão do Pinho.

Os valores da energia específica de refinação correspondentes a cada um dos três níveis de refinação estão expressos na Tabela 3-5. Apresentam-se aí igualmente, os tempos de refinação nas diferentes condições para se atingir o mesmo valor de energia específica de refinação, determinados com base na equação 3-9.

Tempo de refinação para um dado nível de energia específica de refinação (min)						
EER (KWh/t)	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500RPM/5.5Kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg	
E_1	106,6	60,4	31,9	30,0	21,3	16,8
E_2	151,0	85,6	45,2	42,5	30,2	23,8
E_3	195,5	110,8	58,4	55,0	39,1	30,8

Tabela 3-5 Níveis de energia específica de refinação e tempos de refinação nas diferentes condições para o Pinho.

A carga específica de aresta (J/m) calculada para o pinho apresenta a seguinte fórmula, que está igualmente representada no Gráfico 3-5³⁰:

$$SEL = 0,0583 \cdot N + 0,0588 \cdot L - 0,0163 \cdot N \cdot L + 0,300 \quad \text{Equação 3-10}$$

³⁰ Os valores do SEL são reduzidos comparativamente aos valores citados na prática industrial. Este facto pode ser explicado pela dimensão reduzida do rotor e do estator do refinador Valley, que num entreferro que se estende por apenas 3,44 centímetros oferece um comprimento de corte por rotação de $32 \times 7 \times 0,1524 \text{m} = 34,13 \text{m}$, sendo este um valor assinalável.

Pode-se observar o facto interessante, de que para o pinho o efeito de N e de L é semelhante. Desta peculiaridade resulta que os pontos A (N=+1; L=-1) e D (N=-1; L=+1) apresentam valores semelhantes, tornando mais evidente a análise do efeito de N e L sobre as propriedades estudadas.

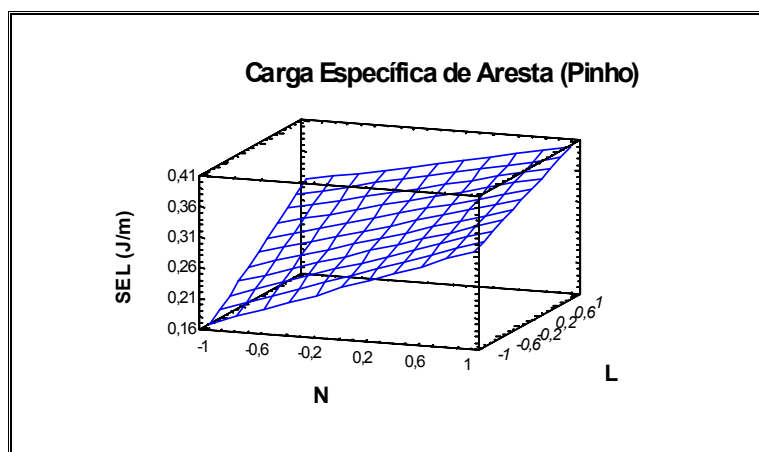


Gráfico 3-5 Carga Específica de Aresta do Pinho

3.4.3. Plano de Experiências do Eucalipto

A potência específica líquida da refinação (W/kg) do eucalipto em função da velocidade de rotação normalizada N e a carga normalizada L é expressa pela seguinte equação:

$$PL = 63,68 \cdot N + 41,32 \cdot L + 5,07 \cdot N \cdot L + 298,0 \quad \text{Equação 3-11}$$

O Gráfico 3-6 representa esta equação em termos tridimensionais. Constata-se que a potência líquida aumenta com N e com L. Pode ser observado ainda que o efeito da velocidade de rotação N é superior ao efeito da carga L em cerca de 50%.

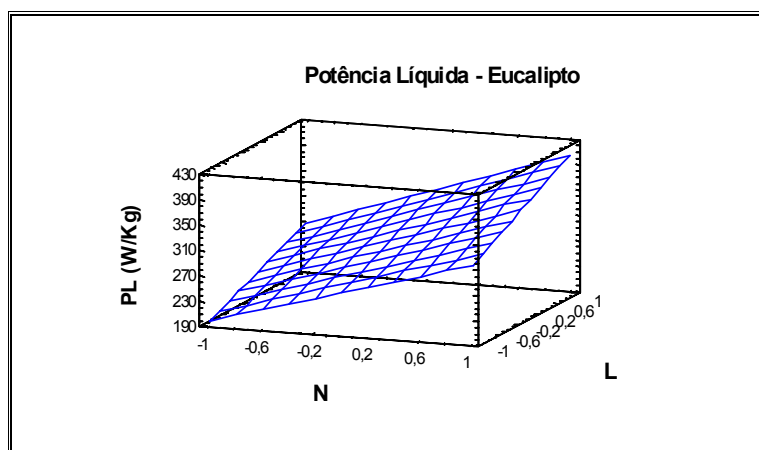


Gráfico 3-6 Potência Líquida do Eucalipto

A Tabela 3-6 apresenta os três graus de refinação estabelecidos como meta para o ponto central O do eucalipto. Os tempos de refinação equivalentes a esses graus de refinação foram obtidos a partir da curva de calibração apresentados no Gráfico 3-2.

Tempo de refinação nas condições padrão (500RPM/5.5Kg)		
Grau de Refinação (°SR)		Tempo (min)
O ₁	30	16,5
O ₂	45	28,5
O ₃	60	40,5

Tabela 3-6 Graus de refinação objectivo e tempos de refinação padrão do Eucalipto.

Os valores da energia específica de refinação correspondentes a cada um dos três níveis de refinação do eucalipto estão expressos na Tabela 3-7. Apresentam-se aí igualmente, os tempos de refinação nas diferentes condições para se atingir o mesmo valor de energia específica de refinação.

Tempo de refinação para um dado nível de energia específica de refinação (min)						
EER (KWh/t)	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500RPM/5.5Kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg	
E ₁	79,5	24,1	17,6	16,5	15,1	11,7
E ₂	137,4	41,6	30,5	28,5	26,1	20,2
E ₃	195,2	59,1	43,3	40,5	37,1	28,7

Tabela 3-7 Níveis de energia específica de refinação e tempos de refinação nas diferentes condições para o Eucalipto.

A carga específica de aresta (J/m) calculada para o eucalipto apresenta a seguinte fórmula, que está igualmente representada no Gráfico 3-7:

$$SEL = 0,0055 \cdot N + 0,0530 \cdot L - 0,0045 \cdot N \cdot L + 0,376 \quad \text{Equação 3-12}$$

Os coeficientes em N e L são positivos, sendo no entanto o valor do coeficiente de interacção negativo. Pode concluir-se assim que para o eucalipto o efeito principal é o da carga L, sendo este efeito cerca de dez vezes superior ao da velocidade de rotação N.

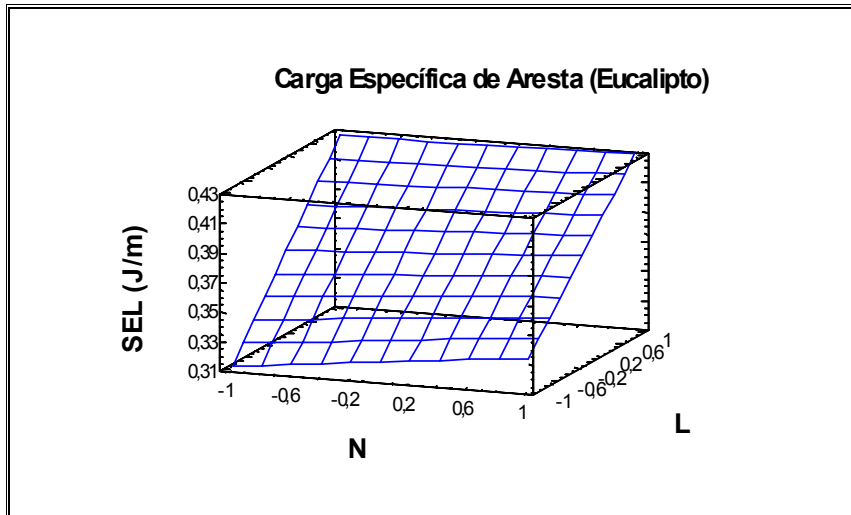


Gráfico 3-7 Carga Específica de Aresta do Eucalipto

3.4.4. Plano de Experiências da Bétula

A potência específica líquida da refinação (W/kg) da bétula em função da velocidade de rotação normalizada N e a carga normalizada L é expressa pela seguinte equação:

$$PL = 61,74 \cdot N + 49,51 \cdot L - 7,71 \cdot N \cdot L + 369,7 \quad \text{Equação 3-13}$$

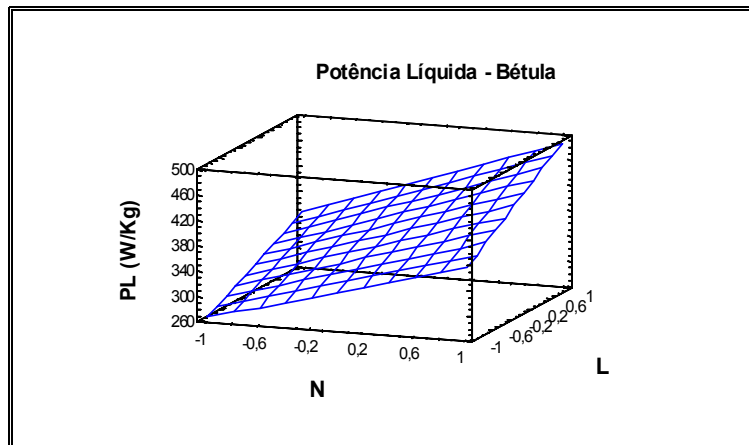


Gráfico 3-8 Potência Líquida da Bétula

O Gráfico 3-8 representa esta equação em termos tridimensionais. Observa-se que a potência líquida aumenta com N e com L , da mesma forma que para os casos anteriores. Verifica-se ainda no caso da bétula que a diferença entre os coeficientes

dos efeitos N e L é inferior aos casos do pinho e do eucalipto. Assim, constata-se neste caso que o coeficiente de N é superior em cerca de 25% ao de L (sendo superior em cerca de 50% para o eucalipto, e cerca de 100% para o pinho).

A Tabela 3-8 apresenta os três graus de refinação estabelecidos como meta para o ponto central O da bétula. Os tempos de refinação equivalentes a esses graus de refinação foram obtidos a partir da curva de calibração apresentados no Gráfico 3-3.

Tempo de refinação nas condições padrão (500RPM/5.5Kg)		
Grau de Refinação (°SR)		Tempo (min)
O ₁	29	15,0
O ₂	48	25,0
O ₃	70	35,0

Tabela 3-8 Graus de refinação objectivo e tempos de refinação padrão da Bétula.

Os valores da energia específica de refinação correspondentes a cada um dos três níveis de refinação da bétula estão expressos na Tabela 3-9. Apresentam-se aí igualmente os tempos de refinação nas diferentes condições para se atingir o mesmo valor de energia específica de refinação.

Tempo de refinação para um dado nível de energia específica de refinação (min)						
EER (KWh/t)	400rpm/4.5kg	400rpm/6.5kg	500RPM/5.5Kg	600rpm/4.5kg	600rpm/6.5kg	
E ₁	85,4	18,2	13,9	15,0	12,9	9,9
E ₂	142,2	30,4	23,1	25,0	21,6	16,5
E ₃	199,0	42,5	32,3	35,0	30,2	23,1

Tabela 3-9 Níveis de energia específica de refinação e tempos de refinação nas diferentes condições para a Bétula.

A carga específica de aresta (J/m) calculada para a bétula apresenta a seguinte fórmula, que está igualmente representada no Gráfico 3-9:

$$SEL = -0,0160 \cdot N + 0,0630 \cdot L - 0,0030 \cdot N \cdot L + 0,471 \quad \text{Equação 3-14}$$

Os coeficientes em L continuam a ser preponderantes no caso da bétula, tal como para o caso do eucalipto. Pode ainda verificar-se que o coeficiente em L é semelhante para os três casos (0,0588 J/m para o pinho, 0,0530 J/m para o eucalipto e 0,0630 J/m para a bétula). No entanto o coeficiente em N varia consideravelmente entre as três matérias-primas. Para o pinho o coeficiente em N é 0,0583 J/m, sendo da

ordem de grandeza do coeficiente em L. Para o eucalipto esse valor é 0,0055 J/m, cerca de um décimo do coeficiente em L.

Interessante é o facto que, para a bétula este coeficiente tem um valor negativo de 0,0160 J/m, cerca de 25% em termos absolutos do valor do coeficiente em L. Esta é uma particularidade da pasta de bétula comparativamente ao pinho e ao eucalipto.

De realçar ainda as diferenças muito significativas nos valores globais do SEL para as três matérias-primas (Gráfico 3-5; Gráfico 3-7; Gráfico 3-9). Particularmente para as condições mais suaves de refinação, o pinho apresenta um valor da ordem dos $0,165\text{Jm}^{-1}$, enquanto o eucalipto e a bétula valores da ordem de $0,315\text{Jm}^{-1}$ e $0,395\text{Jm}^{-1}$, respectivamente.

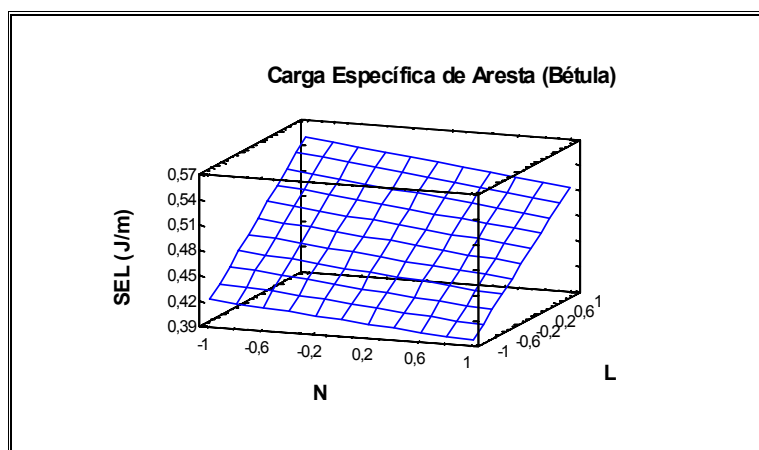


Gráfico 3-9 Carga Específica de Aresta da Bétula.

4. Análise Hidromecânica do Refinador

4.1. Tensões normais e tangenciais

A fórmula obtida para a tensão normal em kPa, calculada de acordo com as equações 2-7 e 2-8, tem a seguinte forma:

$$\sigma_N = 18,70 \cdot L + 102,8 \quad \text{Equação 4-1}$$

estando representada no Gráfico 4-1.

Como seria de esperar, a tensão normal é idêntica para as três pastas e é apenas função da carga L. Não depende assim da natureza das fibras.

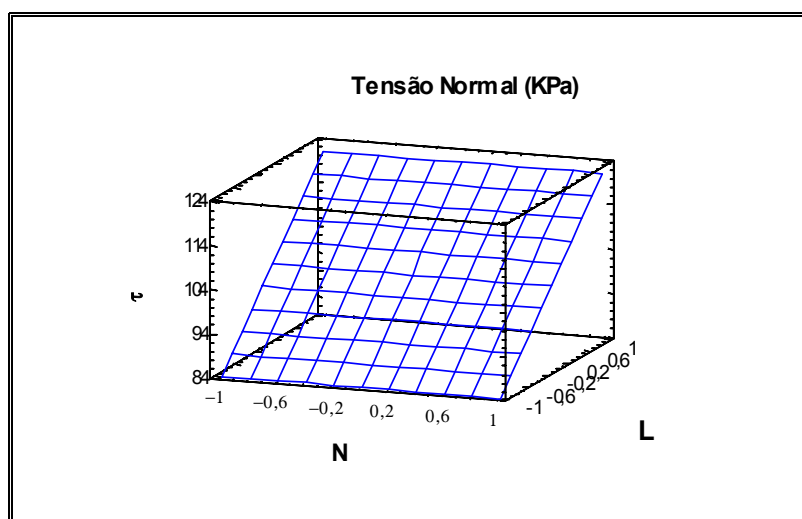


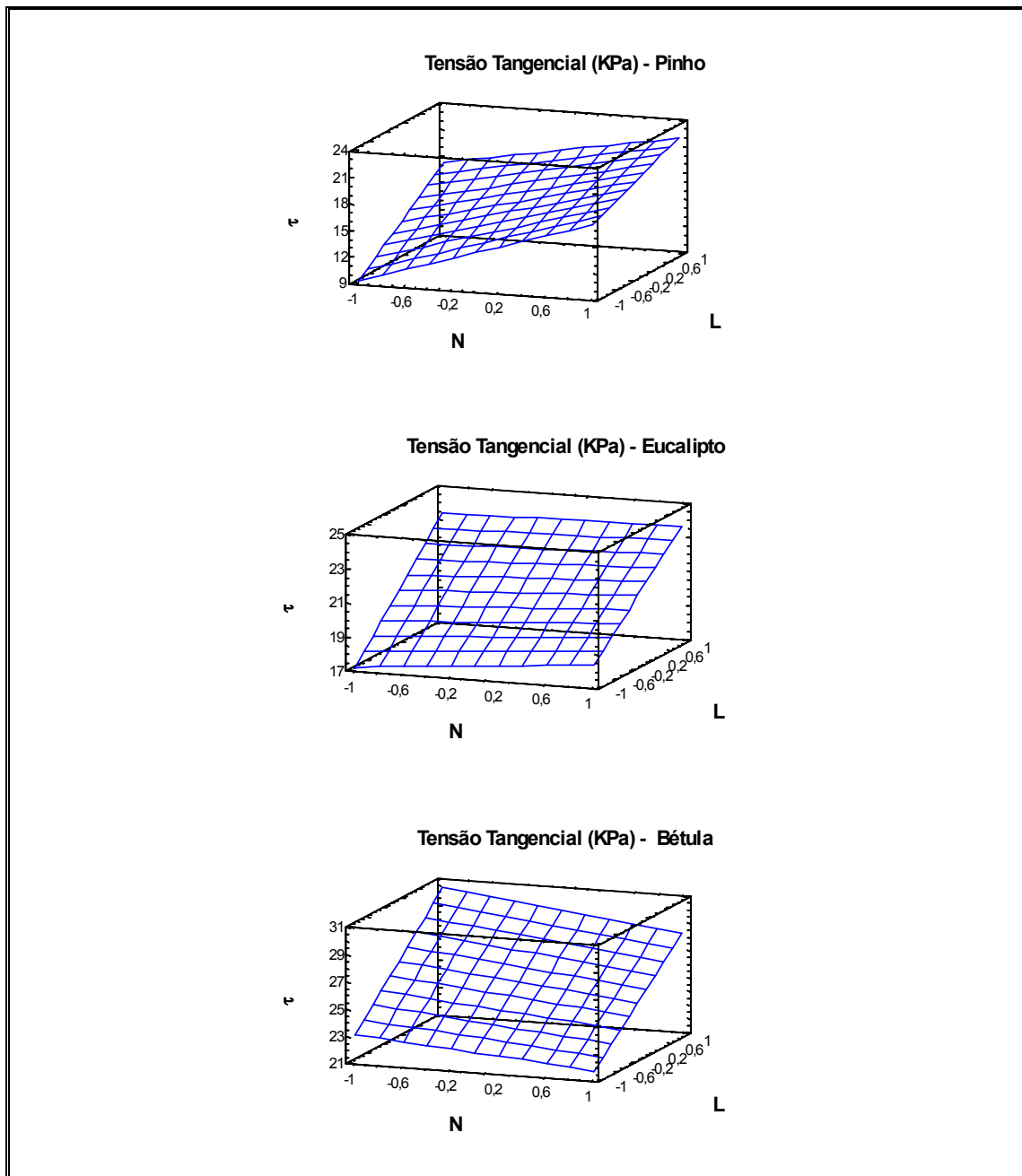
Gráfico 4-1 Tensão normal no entreferro.

Por sua vez, as equações para a tensão tangencial são substancialmente diferentes para as três pastas (observem-se os Gráficos 4-2). Elas são essencialmente dependentes das variações da viscosidade aparente com as condições de refinação e com as propriedades da pasta. Tem-se assim sucessivamente para o pinho (P), o eucalipto (E) e a bétula (B) as seguintes expressões para a tensão tangencial em kPa:

$$\sigma_T^P = 3,20 \cdot N + 3,25 \cdot L - 0,90 \cdot N \cdot L + 16,55 \quad \text{Equação 4-2}$$

$$\sigma_T^E = 0,33 \cdot N + 2,93 \cdot L - 0,23 \cdot N \cdot L + 20,68 \quad \text{Equação 4-3}$$

$$\sigma_T^B = -0,88 \cdot N + 3,48 \cdot L - 0,17 \cdot N \cdot L + 25,88 \quad \text{Equação 4-4}$$



Gráficos 4-2 Tensão tangencial no entreferro.

Uma observação global é que a tensão normal tem um valor que é cerca de cinco vezes superior ao da tensão tangencial. Em relação ao comportamento da tensão tangencial, pode-se verificar que a tensão tangencial assume um valor crescente do pinho, para o eucalipto e para a bétula. Assim, no ponto central (N e L iguais a zero), temos que a tensão tangencial do eucalipto é cerca de 4 kPa superior ao do pinho, e a

bétula é cerca de 5 kPa superior à do eucalipto. Em relação aos efeitos de N e L, constata-se que para o pinho o efeito da carga L é praticamente igual ao efeito da velocidade de rotação N. Por sua vez, para o eucalipto e para a bétula a componente dominante é a da carga; o efeito de L é cerca de nove vezes superior ao de N para o eucalipto, sendo para a bétula o efeito de L cerca de quatro vezes o de N. Interessante é o facto que, ao contrário do caso do pinho e do eucalipto, a bétula apresenta um coeficiente negativo em N; desta forma, aumentos na velocidade de rotação implicam reduções na tensão tangencial.

As fórmulas obtidas para o coeficiente de fricção foram calculadas de acordo com a equação 2-12. Elas têm a seguinte forma, sucessivamente para o pinho, para o eucalipto e para a bétula:

$$f_p = 0,0340 \cdot N + 0,0025 \cdot L - 0,0150 \cdot N \cdot L + 0,161 \quad \text{Equação 4-5}$$

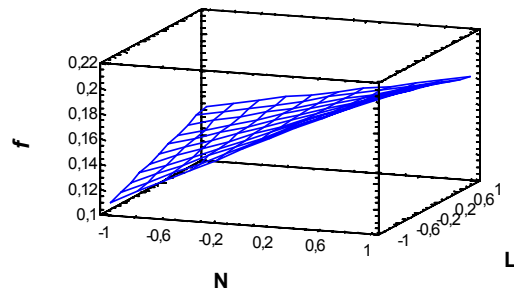
$$f_E = 0,0033 \cdot N - 0,0082 \cdot L - 0,0028 \cdot N \cdot L + 0,203 \quad \text{Equação 4-6}$$

$$f_B = -0,0085 \cdot N - 0,0125 \cdot L + 0,254 \quad \text{Equação 4-7}$$

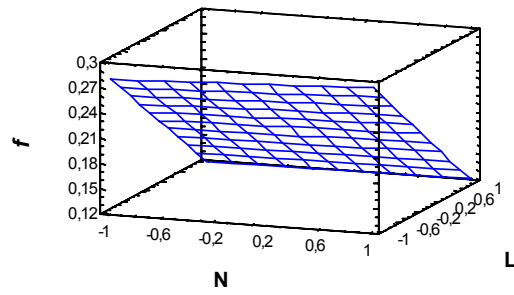
Pode-se observar um valor crescente do coeficiente de fricção nesta sequência apresentada: pinho, eucalipto, bétula. Este facto está em concordância com a análise comparativa da tensão tangencial. No ponto central ocorre um aumento de 0,042 no valor do coeficiente de fricção do pinho para o eucalipto, havendo por sua vez um aumento de 0,051 neste valor do eucalipto para a bétula.

Quanto à análise dos efeitos de N e L, observamos que para o pinho o efeito dominante é o de N, que é cerca de catorze vezes maior que o de L. Para valores de N elevado verifica-se uma saturação do coeficiente de fricção, reduzindo-se a sensibilidade ao efeito de L. No caso do eucalipto e da bétula, o efeito preponderante é o de L, que é 2,5 vezes superior ao de N no eucalipto e 1,5 vezes superior no caso da bétula; estas pastas são assim pouco sensíveis à variação de N. O efeito de L é nestes casos negativo, contrariamente ao pinho. Finalmente, o efeito de N é positivo para o pinho e para o eucalipto, sendo negativo para a bétula. Volta-se a encontrar aqui a particularidade da bétula face ao pinho e ao eucalipto.

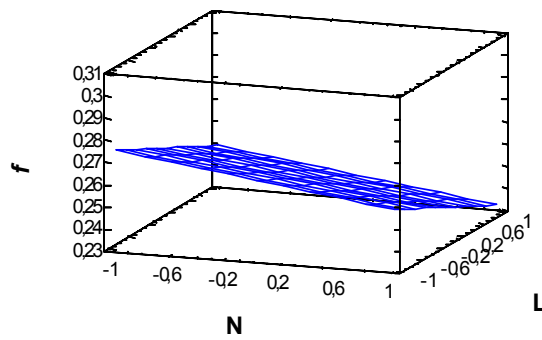
Coefficiente de Fricção - Pinho



Coefficiente de Fricção - Eucalipto



Coefficiente de Fricção - Bétula



Gráficos 4-3 Coeficiente de fricção no entreferro.

4.2. Entreferro

No Gráfico 4-4 representa-se a evolução real do entreferro das três matérias-primas nas condições padrão O (N=0; L=0). Pode observar-se que a evolução ao longo do tempo é praticamente linear para o pinho e para o eucalipto e exponencial para a bétula. O perfil é análogo para as diferentes condições de refinação, no entanto os respectivos coeficientes variam. De realçar o valor extremamente elevado do entreferro para o pinho face ao eucalipto e à bétula. A este resultado não deve ser alheio o tamanho dos flocos das pastas.

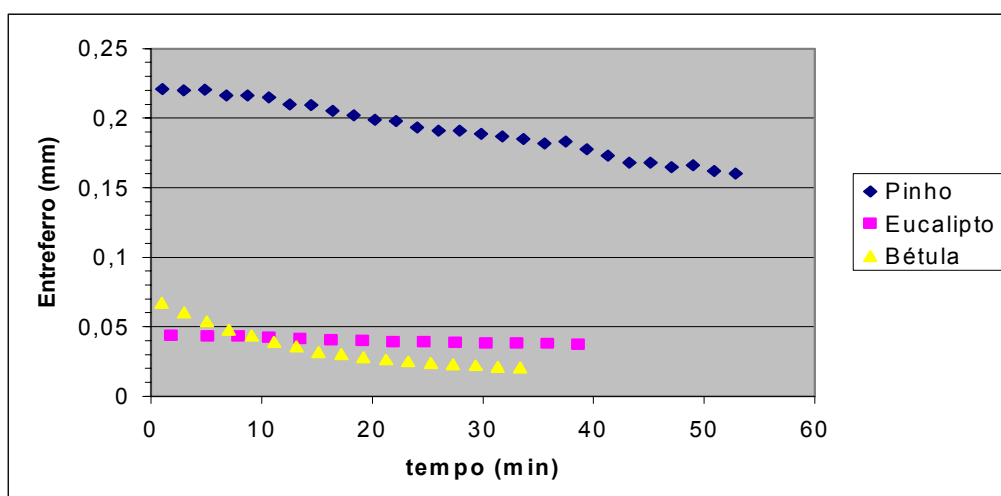


Gráfico 4-4 Evolução real do entreferro em função do tempo nas condições padrão.

As equações de ajuste para o entreferro foram obtidas de acordo com a metodologia explicitada no Anexo 5 – Curvas de Ajuste da Evolução do LVDT. Elas têm a seguinte forma, sucessivamente para o pinho, para o eucalipto e para a bétula no qual t está em minutos e e em mm:

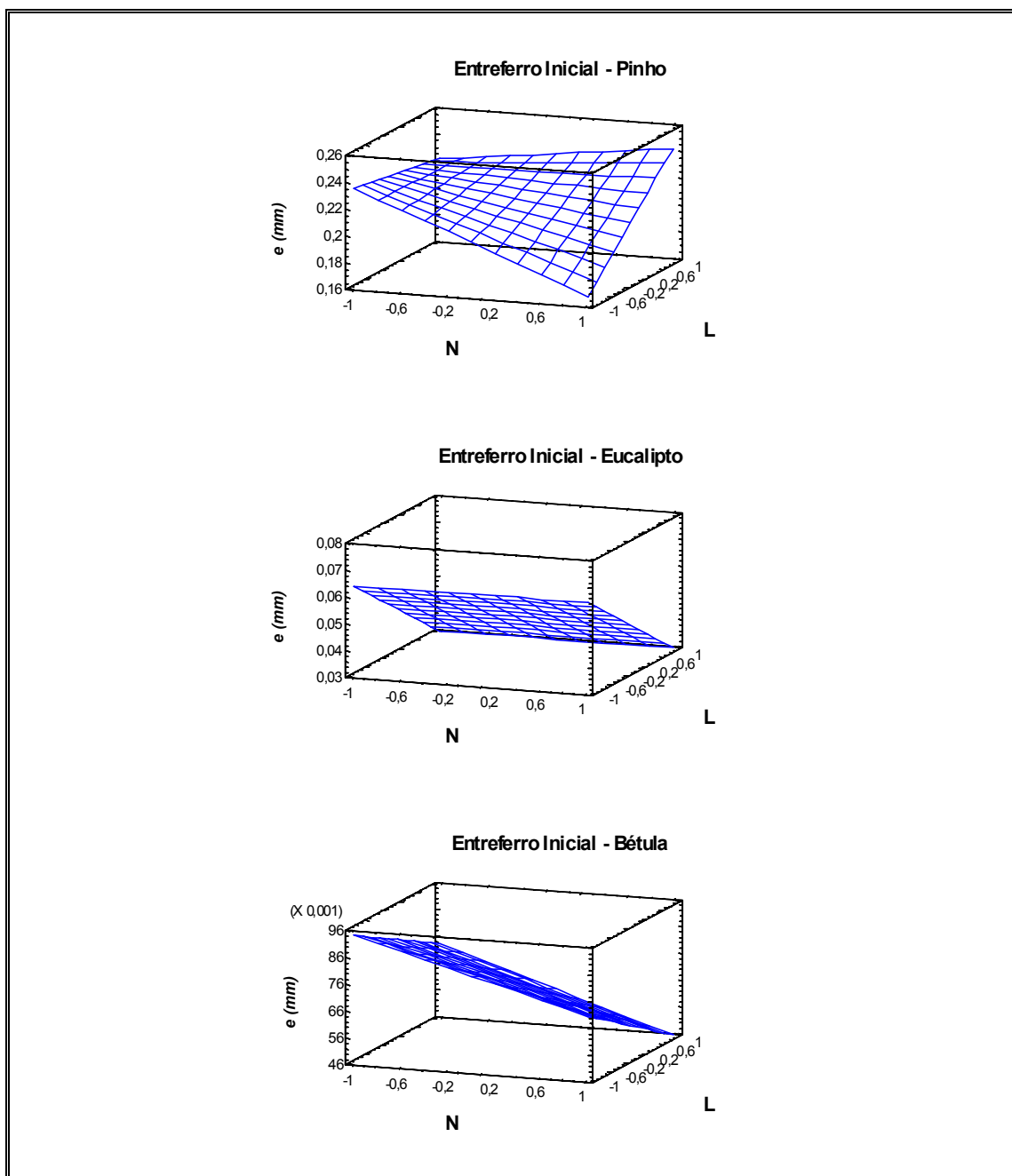
$$e_p = (-3,34 \times 10^{-4} \cdot N - 1,21 \times 10^{-4} \cdot L - 1,13 \times 10^{-4} \cdot N \cdot L - 8,67 \times 10^{-4}) * t + (-0,0124 \cdot N + 0,0164 \cdot L + 0,0225 \cdot N \cdot L + 0,217) \quad \text{Equação 4-8}$$

$$e_E = (-2,32 \times 10^{-6} \cdot N + 8,80 \times 10^{-6} \cdot L - 3,59 \times 10^{-6} \cdot N \cdot L - 1,36 \times 10^{-4}) * t + (-0,0166 \cdot L + 0,047) \quad \text{Equação 4-9}$$

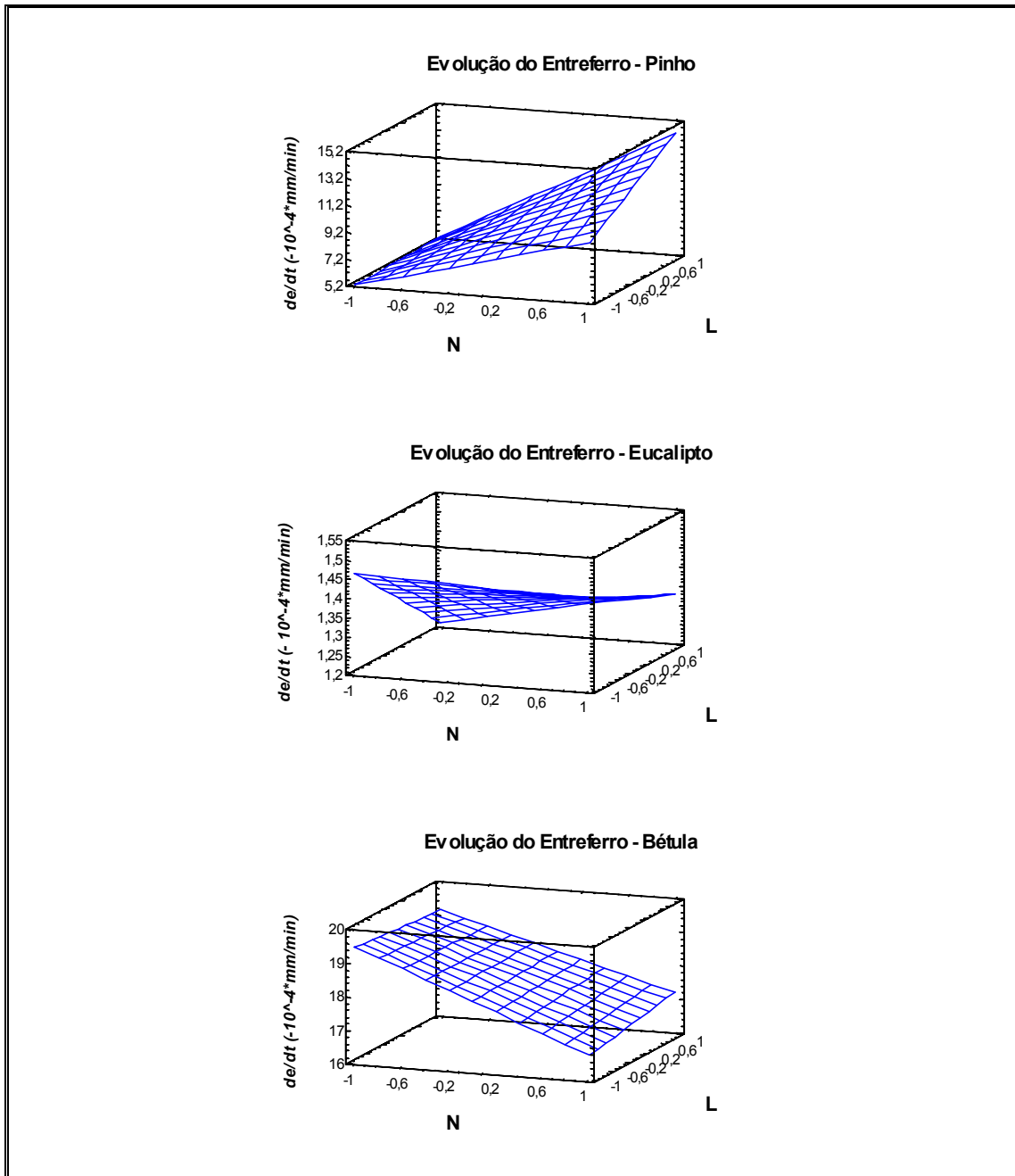
$$e_B = 3,577 \times 10^{-5} \times t^2 + (1,17 \times 10^{-4} \cdot N - 6,25 \times 10^{-6} \cdot L - 1,89 \times 10^{-5} \cdot N \cdot L - 18,2 \times 10^{-4}) * t + (-0,013 \cdot N - 0,011 \cdot L - 0,001 \cdot N \cdot L + 0,071)$$

Equação 4-10

Nos Gráficos 4-5 encontra-se representado o valor do entreferro no início da refinação e nos Gráficos 4-6 representa-se o declive do valor do entreferro em função do tempo para as diferentes matérias-primas e condições de refinação. No caso da bétula representou-se o declive inicial, já que para esta matéria-prima o entreferro obedece nesta gama a uma equação de segundo grau em relação ao tempo.



Gráficos 4-5 Valor do entreferro no início da refinação (mm).



Gráficos 4-6 Evolução do entreferro (-10^{-4} mm/min).

No que concerne à análise do entreferro inicial do pinho, verifica-se que o coeficiente em N é negativo, o que significa que o aumento da velocidade de rotação provoca uma diminuição do entreferro. O coeficiente em N é cerca de 32% vezes superior a L. O efeito positivo de L é um facto curioso, já que seria expectável que

este efeito fosse negativo. Mas isto resulta do facto de existir um elevado coeficiente de interacção entre N e L, carecendo de análise futura para a sua explicação. Observando o gráfico do entreferro inicial, verifica-se que a cargas reduzidas N tem um efeito negativo acentuado no entreferro, enquanto que a cargas elevadas o efeito de N é reduzido; neste caso ocorre uma inversão do efeito de N, que é ligeiramente positivo. Explica-se assim o valor não esperado do efeito em L. Quanto ao eucalipto salienta-se o facto de o coeficiente em N ser nulo, o que significa que apenas a carga exerce um efeito no entreferro. No caso da bétula, verifica-se que ambos os coeficientes são negativos e têm a mesma ordem de grandeza, existindo uma reduzida interacção entre N e L. Em termos comparativos ao nível do ponto central (ou seja, nas condições padrão), constata-se que o pinho tem o maior entreferro, sendo o valor da bétula cerca de um terço e o do eucalipto cerca de um quinto.

No que respeita à análise da evolução do entreferro no ponto central, verifica-se que a evolução mais rápida é a da bétula (tendo em conta a sua evolução inicial, com o valor de $-18,2 \times 10^{-4} \text{ mm/min}$); a velocidade de evolução do pinho cerca de metade do valor da bétula ($-8,67 \times 10^{-4} \text{ mm/min}$) e o valor do eucalipto é cerca de 13 vezes menor ($-1,36 \times 10^{-4} \text{ mm/min}$). No que concerne à análise dos efeitos sobre a evolução do entreferro, os coeficientes em N e L para o pinho são negativos; no entanto, o coeficiente em N é cerca de 2,8 vezes superior ao de L. Para o eucalipto, verifica-se que os efeitos de N e de L são bastante inferiores ao valor do ponto central (o efeito central é de $-1,36 \times 10^{-4} \text{ mm/min}$, enquanto os efeitos em N e em L têm uma grandeza da ordem de $10^{-6} \cdot \text{mm/min}$). Quanto à bétula, efeito dominante é o de N (cerca de dezanove vezes superior ao efeito de L). Assim a velocidade de rotação é o factor preponderante na taxa de evolução do entreferro da bétula, conduzindo maiores velocidades a menores taxas de evolução.

O gradiente de velocidade no entreferro $G \text{ (s}^{-1}\text{)}$ foi calculado de acordo com a fórmula:

$$G = \frac{2\pi \cdot \dot{N} \cdot r}{e} \quad \text{Equação 4-11}$$

em que $\dot{N} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ é velocidade de rotação do rotor, $r \text{ (m)}$ é o raio do rotor e $e \text{ (m)}$ é o valor do entreferro.

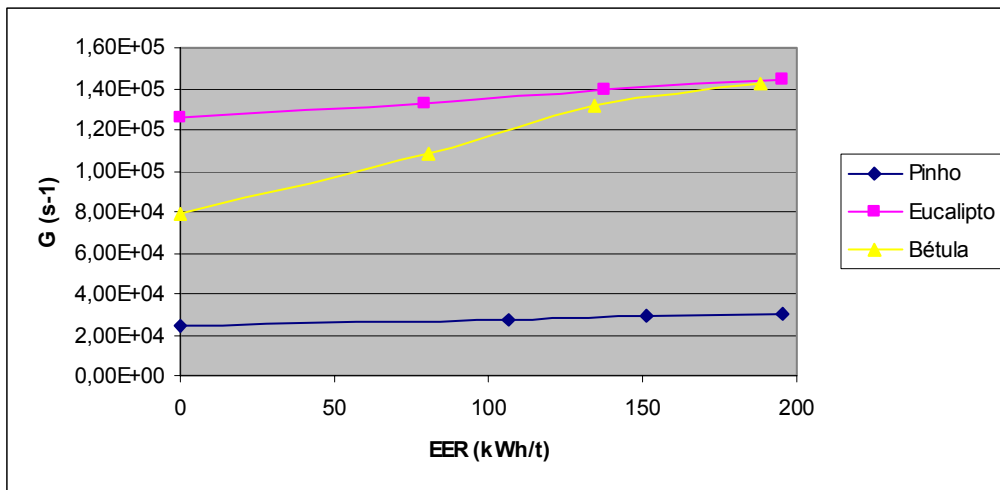


Gráfico 4-7 $G(s^{-1})$ em função da energia específica de refinação no ponto central.

As expressões de $G(s^{-1})$ em função de velocidade de rotação N , da carga L e da energia específica de refinação E (kWh/t) apresentam a forma seguinte, sucessivamente para o pinho, para o eucalipto e para a bétula:

$$G_p = (9,966 \cdot E + 6538) \times N + (-10,232 \cdot E - 2618) \times L + (-3,400 \cdot E - 3140) \times N \times L + (31,73 \cdot E + 24186) \quad \text{Equação 4-12}$$

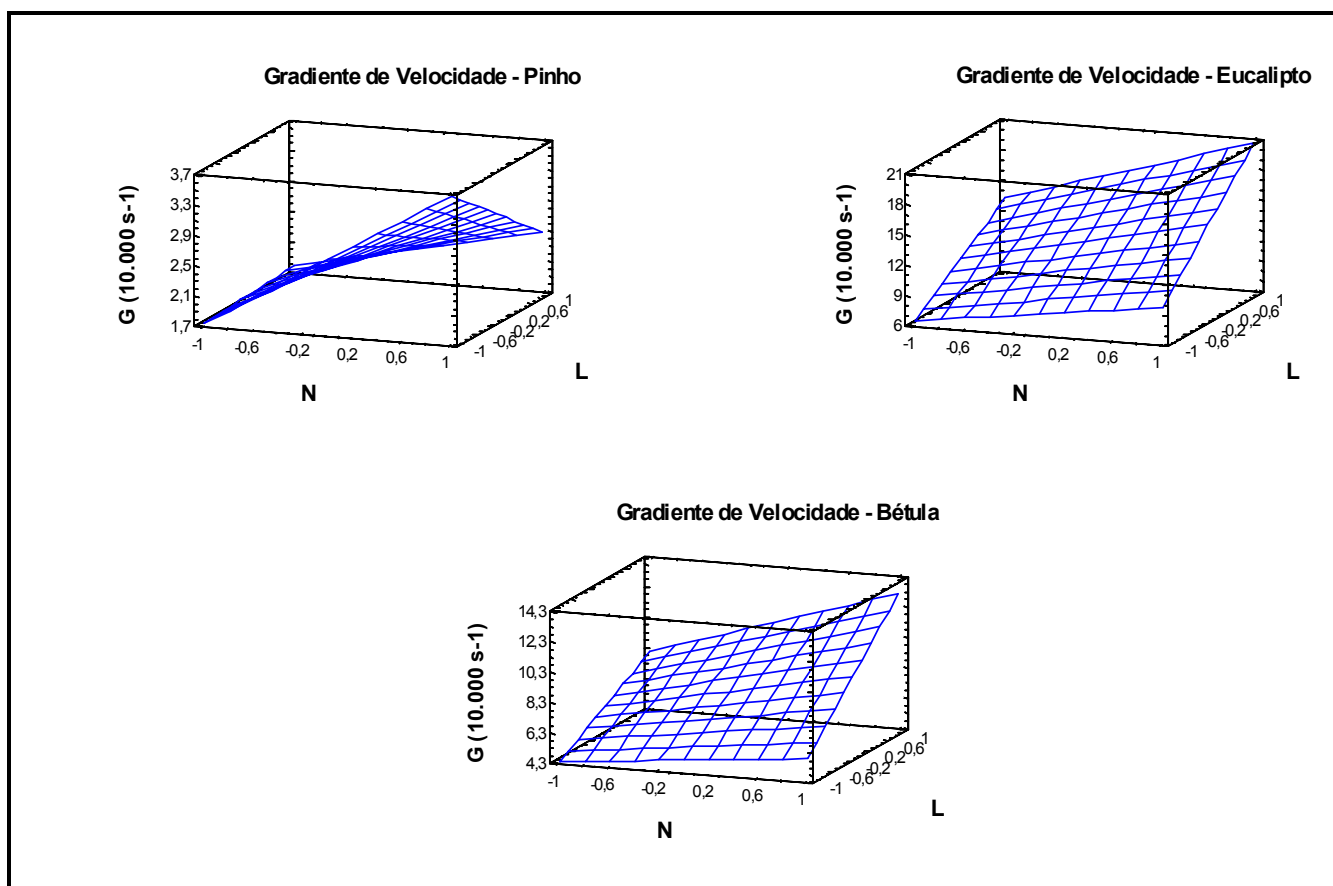
$$G_e = 25499 \times N + (46,801 \cdot E + 45310) \times L + 9,803 \times N \times L + (94,474 \cdot E + 125767) \quad \text{Equação 4-13}$$

$$G_b = (-0,6390 \cdot E^2 + 98,841 \cdot E + 15992) \times N + (143,3 \cdot E + 28369) \times L + (23,52 \cdot E + 9970) \times N \times L + (344,9 \cdot E + 80496) \quad \text{Equação 4-14}$$

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 4-7 apresenta a evolução do ponto central das curvas de ajuste para as diferentes matérias-primas. Pode-se observar que o valor central inicial do pinho é significativamente inferior aos das outras matérias-primas, com um valor de $24.186s^{-1}$. O valor central inicial da bétula é cerca de três vezes superior ($77.839s^{-1}$) e o valor do eucalipto é cerca de 60% superior a este último ($125.845s^{-1}$). Quanto ao efeito de N e de L , pode observar-se que para o eucalipto e a bétula estes são positivos, sendo no entanto superior o efeito de L em relação a N (considerando o valor inicial, tem-se que o efeito L é 70% superior em relação ao de N para a bétula, sendo 76% no caso do eucalipto). No caso do pinho pode-se observar que o efeito dominante é o de N ,

sendo o efeito de L afectado significativamente pelo coeficiente de interação. Ocorre neste caso uma redução do efeito da carga a baixas velocidades.



Gráficos 4-8 Gradiente de velocidade no entreferro no nível E₂.

4.3. Viscosidade aparente

Os valores relativos à viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) foram calculados de acordo com a equação 2-15. As fórmulas que relacionam a viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) têm a seguinte forma, sucessivamente para o pinho, para o eucalipto e para a bétula:

$$\begin{aligned} \mu_{ap}^P = & -0,035 \times N + (-6,74 \times 10^{-5} \cdot E + 0,208) \times L \\ & + (-6,30 \times 10^{-5} \cdot E - 0,004) \times N \times L + (-6,82 \times 10^{-4} \cdot E + 0,711) \end{aligned} \quad \text{Equação 4-15}$$

$$\mu_{ap}^E = (4,44 \times 10^{-5} \cdot E - 3,38 \times 10^{-2}) \times N - 4,10 \times 10^{-2} \times L + (-7,89 \times 10^{-6} \cdot E + 5,18 \times 10^{-3}) \times N \times L + (-1,25 \times 10^{-4} \cdot E + 0,186)$$

Equação 4-16

$$\mu_{ap}^B = (3,63 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 7,45 \times 10^{-2}) \times N + (-1,16 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 3,74 \times 10^{-4} \cdot E - 7,99 \times 10^{-2}) \times L + (3,60 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 1,20 \times 10^{-4} \cdot E) \times N \times L + (4,70 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 1,80 \times 10^{-3} \cdot E + 0,372)$$

Equação 4-17

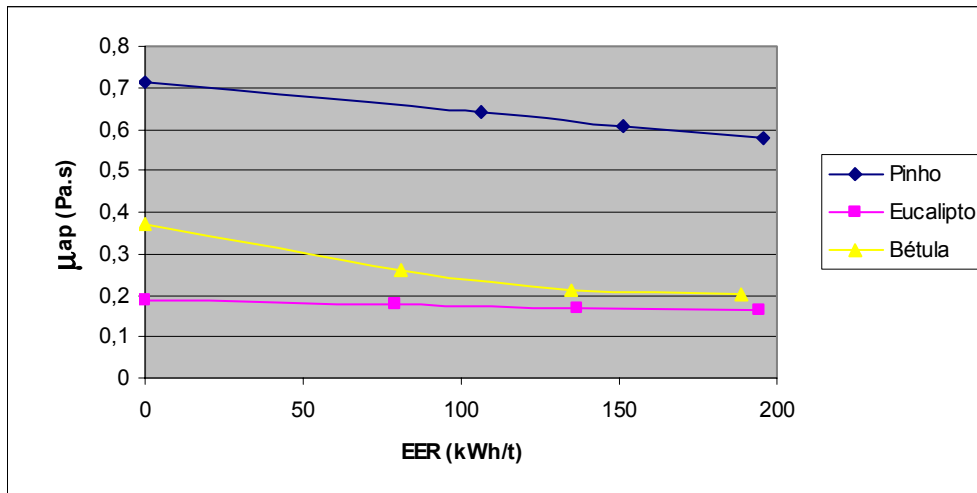
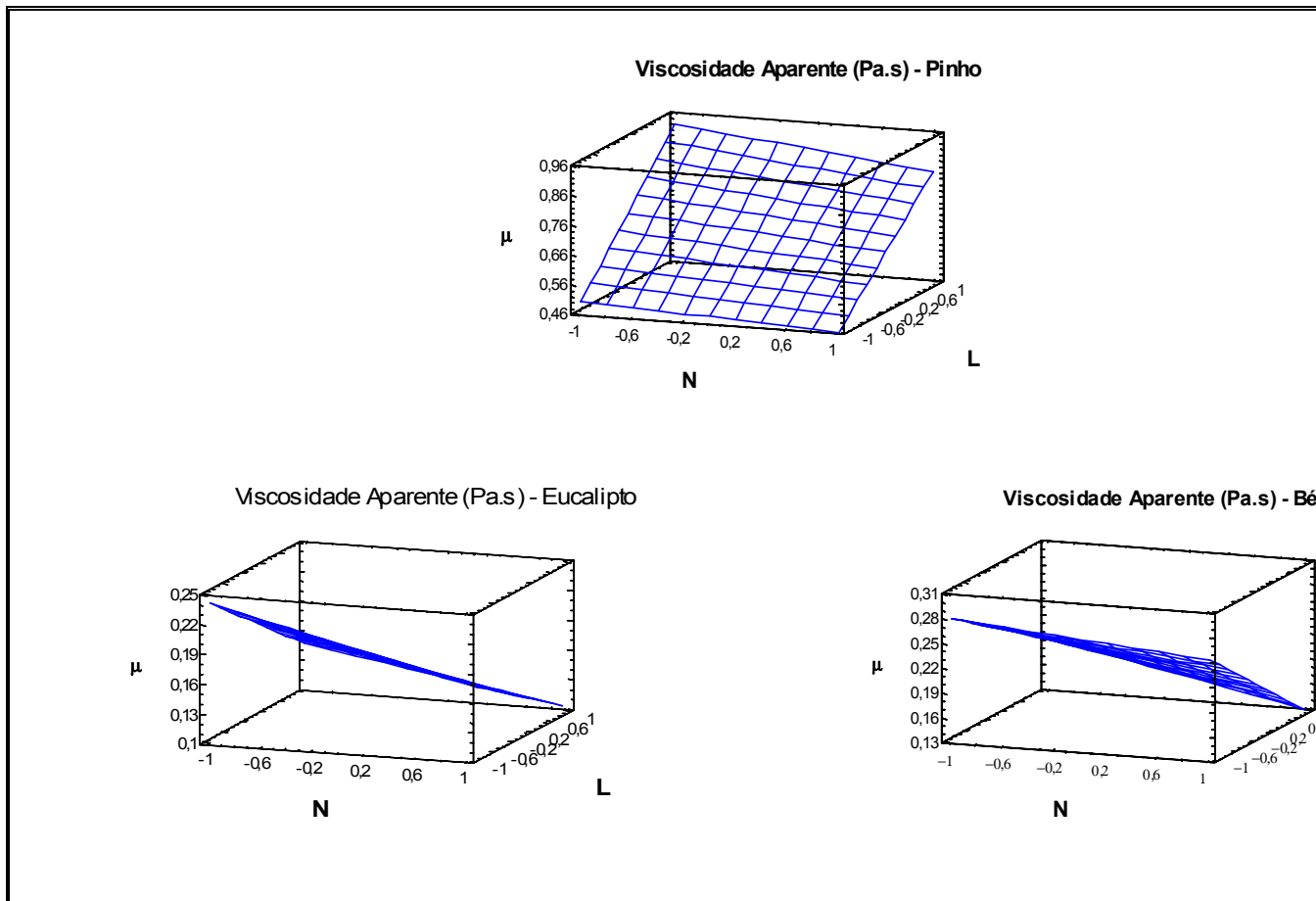


Gráfico 4-9 Viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) em função da energia específica de refinação no ponto central.

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 4-9 apresenta a evolução da viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) no ponto central, para as três matérias-primas. A análise do ponto central no início da refinação permite verificar que a viscosidade aparente mais elevada é a do pinho (0,711 Pa.s); a da bétula tem por sua vez um valor de cerca de metade (0,372 Pa.s) e o eucalipto de cerca de um quarto (0,186 Pa.s). Outro ponto de análise importante é a verificação de que a evolução da refinação provoca uma diminuição da viscosidade aparente, o que significa que a refinação tem um efeito reofluidificante. Tal facto vai de encontro aos resultados previamente obtidos (Kao, 1983, p.875; Radoslavova, 1996, p.93).



Gráficos 4-10 Viscosidade aparente das suspensões (nível de energia E2).

Os Gráficos 4-10 representam a viscosidade aparente das três matérias-primas no segundo nível de energia específica de refinação do plano de experiência (E2). No que respeita à análise dos efeitos, constata-se que para o pinho o efeito dominante é o de L, cerca de seis vezes superior a N. Pode observar-se ainda que o aumento da carga provoca um aumento da viscosidade; por sua vez, N tem um efeito contrário nesta gama de actuação. Quanto ao eucalipto, pode observar-se que N e L têm um coeficiente inicial da mesma ordem de grandeza; ambos os coeficientes têm um valor negativo, o que permite concluir que nesta gama de operação N e L têm um efeito reofluidificante. As observações efectuadas em relação ao eucalipto são igualmente válidas em relação à bétula. Em resumo, a viscosidade aparente do pinho com L evolui de forma inversa da bétula e do eucalipto; no entanto as três pastas diminuem a sua viscosidade aparente com aumentos da velocidade de rotação.

4.4. Relação entre a viscosidade aparente da pasta e o entreferro

No Gráfico 4-11 apresenta-se a relação entre a viscosidade aparente e o gradiente de velocidade no entreferro para todos ensaios de refinação efectuados, na qual se incluíram todas as matérias-primas. Pode observar-se que a viscosidade aparente μ_{ap} decresce com o aumento do gradiente de velocidade. A suspensão de pasta pode assim ser considerada como actuando como um fluido não-newtoniano pseudoplástico (Kao, 1983, p.875). Muitos modelos matemáticos diferentes foram propostos por diversos investigadores tentando descrever o comportamento reológico dos fluidos pseudoplásticos. Entre estes modelos destacam-se os de Prandlt-Eyring, Ellis, Reiner-Philippoff, Sisko, Cross, Meter e Herschel-Bulkley (Kao, 1983, p.870-871). No entanto, a equação que melhor descreve a maior parte dos fluidos pseudoplásticos é a lei da potência de Ostwald – de Waale:

$$\mu_{ap} = K.G^{n-1} \quad \text{Equação 4-18}$$

O coeficiente K é um índice de ‘consistência’ análogo à viscosidade de um fluido newtoniano. O expoente n é um índice do comportamento do fluxo que caracteriza o grau de desvio do comportamento newtoniano.

Para o conjunto dos ensaios de refinação efectuados é possível estabelecer a seguinte equação de ajuste:

$$\ln \mu_{ap} = -0,7541 \cdot \ln G + 7,149 \quad \text{Equação 4-19}$$

$$r^2 = 0,8992$$

Desta expressão pode-se retirar os índices K e o índice n , que têm os seguintes valores:

$$K = 1272,3 \quad n = 0,2459$$

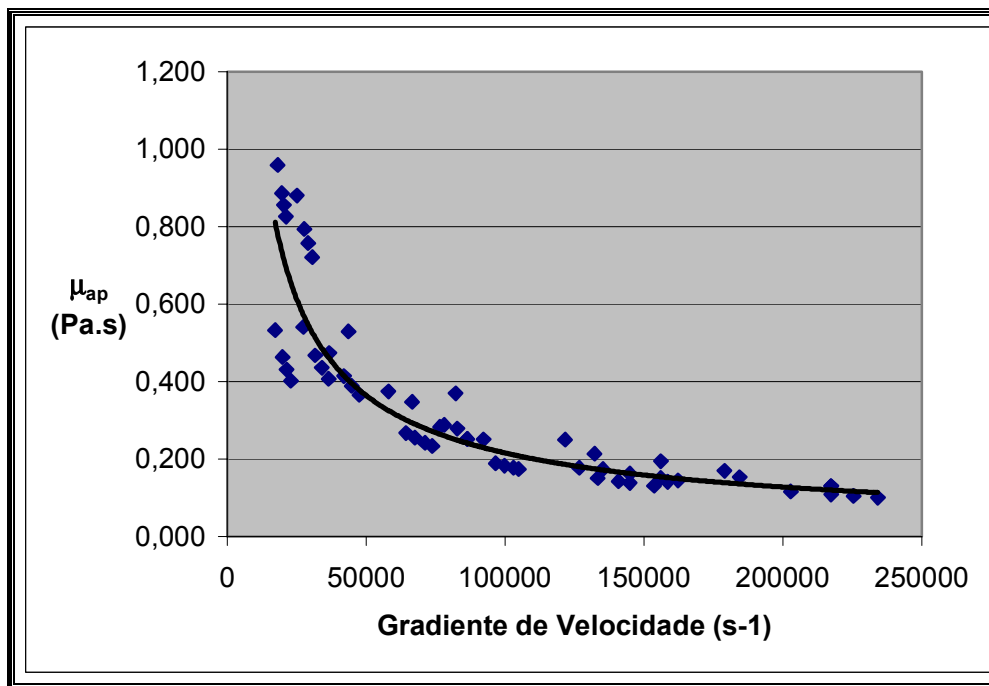


Gráfico 4-11 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e G (s^{-1}) no entreferro.

Kao (1983) referiu ensaios com uma suspensão de pasta a 4%, apresentando um valor de $n = 0,58$. Radoslavova (1996) obteve valores de n entre 0,51 e 0,66. Por sua vez Norman et al (1978) apresentaram um valor de $n = 1/3$, que está próximo do valor obtido nos ensaios efectuados no âmbito desta tese. No entanto não são apresentados dados acerca das características da suspensão (matéria-prima e consistência). No seu trabalho, Norman e os seus colaboradores referem um estudo utilizando suspensões diluídas de fibras sintéticas e de pasta. Nele afirma-se que o desvio do comportamento newtoniano para um fluxo turbulento plenamente desenvolvido (que não é o caso das refinações efectuadas no Valley) aumenta com a concentração volumétrica da suspensão, com a razão de aspecto L/D e com a flexibilidade. Este dado vai de encontro ao facto de os maiores desvios deste comportamento ocorrerem na suspensão de pinho, onde existe uma maior flexibilidade das fibras (como se pode verificar nos pontos 3.1 e 5.5 desta tese).

A influência da razão de aspecto L/D da fibra sobre a viscosidade aparente de uma suspensão fibrosa obedece à lei reológica de Batchelor (Radoslavova, 1996, p.85), que tem a seguinte fórmula:

$$\ln\left(\frac{\mu_{ap}}{\mu_{\acute{a}gua}}\right) = n_1 + n_2 \cdot \ln\left(\frac{L}{D}\right) \quad \text{Equação 4-20}$$

em que n_1 e n_2 são coeficientes de ajuste e $\mu_{\acute{a}gua}$ é a viscosidade da água. Dada a proximidade entre os valores da razão de aspecto L/D nas três matérias-primas utilizadas, justifica-se assim numa primeira aproximação o tratamento global do comportamento reológico das suspensões fibrosas utilizadas nas refinações.

Pode-se observar no Gráfico 4-12, no Gráfico 4-13 e no Gráfico 4-14 a relação entre a viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro e (μm) nas três velocidades de rotação utilizadas. Os três gráficos utilizam uma escala logarítmica, estando em cada um deles representadas as três matérias-primas.

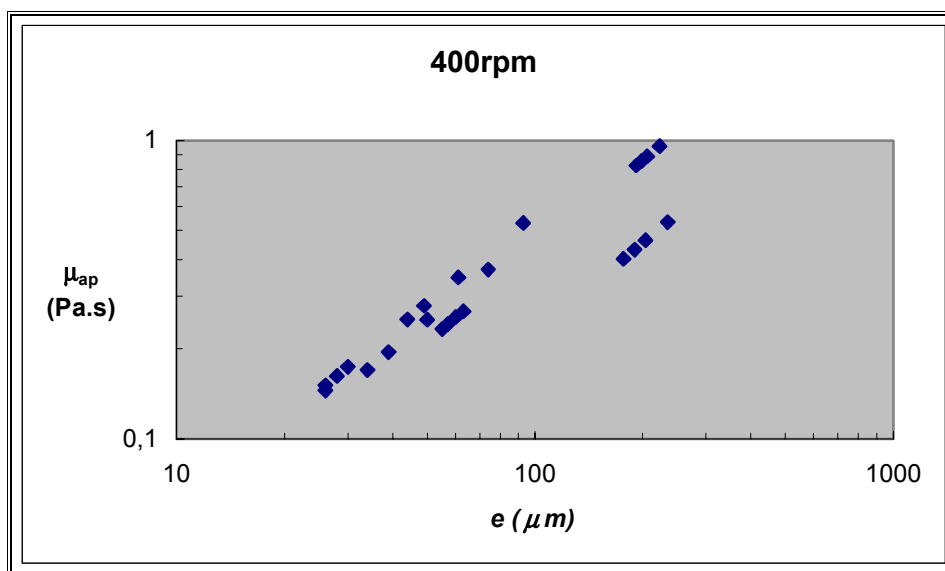


Gráfico 4-12 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro (μm) a 400rpm.

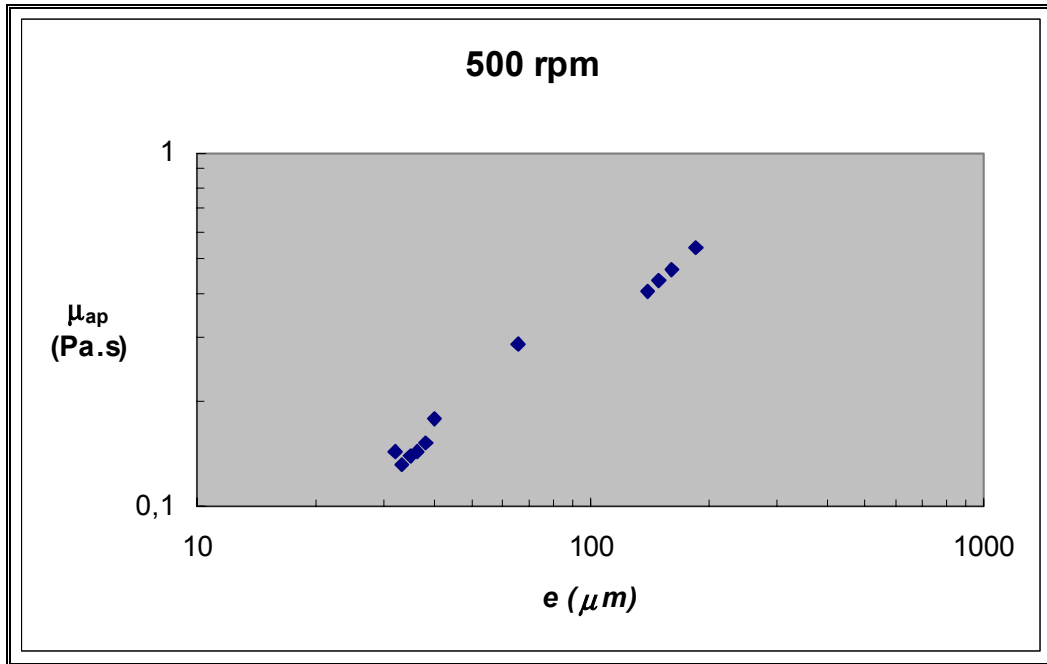


Gráfico 4-13 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro (μm) a 500rpm.

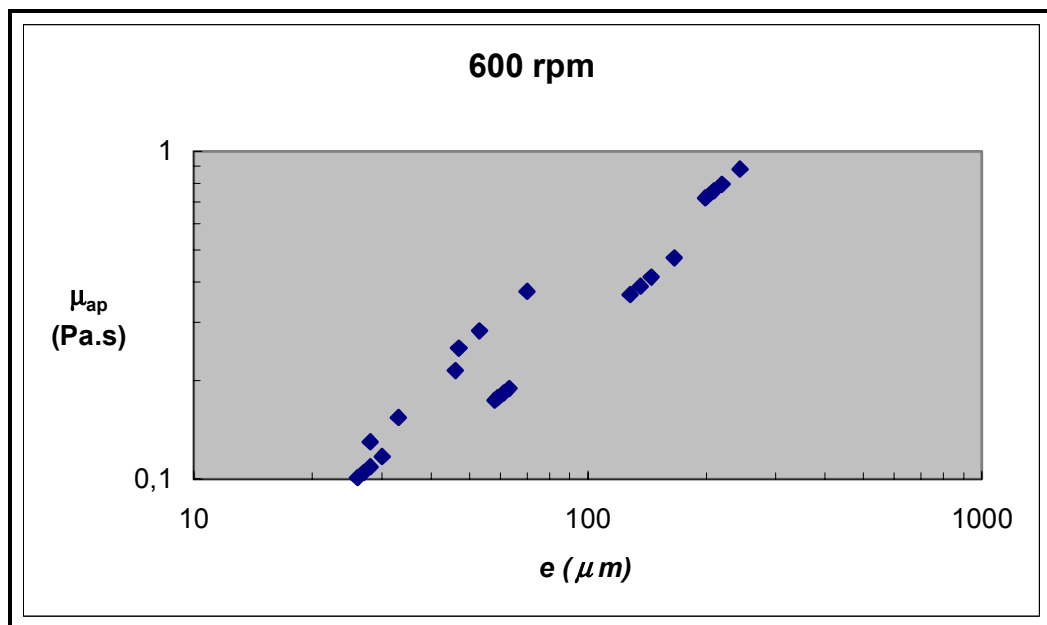


Gráfico 4-14 Relação entre μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro (μm) a 600rpm.

Apesar de alguma dispersão de valores experimentais, foi possível obterem-se as seguintes equações de ajuste entre a viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) e o entreferro e (μm), respectivamente a 400rpm, a 500rpm e a 600rpm:

$$\ln \mu_{ap}^{400RPM} = 0,7000 \cdot \ln e - 4,140 \quad r^2 = 0,861 \quad \text{Equação 4-21}$$

$$\ln \mu_{ap}^{500RPM} = 0,7739 \cdot \ln e - 4,668 \quad r^2 = 0,981 \quad \text{Equação 4-22}$$

$$\ln \mu_{ap}^{600RPM} = 0,8711 \cdot \ln e - 5,048 \quad r^2 = 0,922 \quad \text{Equação 4-23}$$

Substituindo as equações 4-21 a 4-23 conjuntamente com a equação 4-19 na equação 2-13, obtiveram-se as seguintes relações entre a tensão tangencial τ_t (Pa) e o valor do entreferro e (μm):

$$\ln \tau_t^{400RPM} = -0,2282 \cdot \ln e + 10,83 \quad \text{Equação 4-24}$$

$$\ln \tau_t^{500RPM} = -0,2523 \cdot \ln e + 11,00 \quad \text{Equação 4-25}$$

$$\ln \tau_t^{600RPM} = -0,2840 \cdot \ln e + 11,13 \quad \text{Equação 4-26}$$

A fórmula global para a relação entre a tensão tangencial τ_t (Pa) e o valor do entreferro e (μm) é a seguinte, obtida pelo ajuste dos coeficientes das equações acima em função da frequência de rotação Ω (rpm):

$$\ln \tau_t = (2,79 \cdot 10^{-4} \times \Omega - 0,115) \cdot \ln e + (1,50 \cdot 10^{-3} \times \Omega + 10,2) \quad \text{Equação 4-27}$$

Constata-se assim, conforme seria de esperar, que no refinador Valley a tensão tangencial aumenta com a velocidade de rotação para um mesmo valor do entreferro. No entanto, o efeito da variação do entreferro diminui com o aumento da velocidade de rotação.

A fórmula global para a relação entre a viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) da suspensão e a tensão tangencial τ_t (Pa) pode ser estabelecida conjugando as fórmulas 2-13 e 4-19. A fórmula global obtida é a seguinte:

$$\ln \tau_t = -0,3260 \cdot \ln \mu_{ap} + 9,480 \quad \text{Equação 4-28}$$

4.5. Eficiência Energética

As equações que representam o rendimento energético médio do refinador Valley são as seguintes, estando representadas nos Gráficos 4-15:

$$\eta_p = 3,88 \cdot N + 2,63 \cdot L - 0,73 \cdot N \cdot L + 16,0 \quad \text{Equação 4-29}$$

$$\eta_E = 2,23 \cdot N + 2,43 \cdot L - 0,02 \cdot N \cdot L + 22,0 \quad \text{Equação 4-30}$$

$$\eta_B = 1,53 \cdot N + 2,68 \cdot L + 0,08 \cdot N \cdot L + 27,4 \quad \text{Equação 4-31}$$

Pode-se constatar que o maior rendimento energético no ponto central é o da bétula, sendo o valor do eucalipto cerca de 20% menor e o pinho 42%. Os efeitos em N e em L são ambos positivos, para as três matérias-primas. O valor dos coeficientes em N e em L também são inferiores para o pinho e para o eucalipto comparativamente ao da bétula. Para N, a bétula exibe um coeficiente que representa 39% do valor do pinho, sendo o do eucalipto 69%. A bétula e o pinho apresentam em relação a L coeficientes semelhantes, sendo o eucalipto inferior em menos de 10%. Estes valores estão coerentes com os resultados apresentados por Radoslavova (1996, p.128).

Radoslavova (1996, p.26) estabeleceu no seu estudo que os três parâmetros que influenciam o rendimento são a viscosidade aparente, o valor do entreferro e a velocidade de rotação. Para o Valley funcionando a carga constante, as equações 4-21 a 4-23 estabelecem uma relação entre o entreferro e a viscosidade aparente. Fica-se então reduzido a duas variáveis, o entreferro (ou a viscosidade aparente, já que estão mutuamente determinadas) e a velocidade de rotação. Assim, do Gráfico 4-16 ao Gráfico 4-18 apresenta-se a relação entre o rendimento η (%) e o entreferro e (mm) respectivamente a 400rpm, 500rpm e 600rpm.

Pode-se assim obter as seguintes relações lineares:

$$\eta^{400rpm} = -68,3 \cdot e + 26,1 \quad r^2 = 0,640 \quad \text{Equação 4-32}$$

$$\eta^{500rpm} = -73,2 \cdot e + 26,1 \quad r^2 = 0,946 \quad \text{Equação 4-33}$$

$$\eta^{600RPM} = -42,5 \cdot e + 28,2 \quad r^2 = 0,444 \quad \text{Equação 4-34}$$

Estas relações entre a viscosidade aparente da pasta e a velocidade de rotação do refinador foi deduzida das correlações entre a viscosidade e o entreferro a

diferentes velocidades de rotação. Será necessário fazer um estudo mais aprofundado para as validar, tendo em conta a evolução das propriedades morfológicas da fibra, já que elas evoluem ao longo da refinação.

Relacionando os respectivos coeficientes com a frequência da rotação, foi possível estabelecer a seguinte fórmula geral relacionando o rendimento $\eta(\%)$, o entreferro e (mm) e a frequência de rotação Ω (rpm):

$$\eta = (1,78 \times 10^{-3} \cdot \Omega^2 - 1,65 \times \Omega + 3,06 \cdot 10^2) \cdot e + (1,01 \times 10^{-4} \cdot \Omega^2 - 9,12 \times 10^{-2} \cdot \Omega + 46,4) \quad \text{Equação 4-35}$$

Esta fórmula serve apenas de suporte ao raciocínio acima acerca das variáveis que afectam o rendimento do Valley. Observando-se do Gráfico 4-19 ao Gráfico 4-21, constata-se que se pode seguir a mesma metodologia para estabelecer uma fórmula global relacionando o rendimento $\eta(\%)$, a viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s) e a frequência de rotação Ω (rpm). Obtêm-se assim as seguintes relações lineares:

$$\eta^{400rpm} = -13,0 \cdot \mu_{ap} + 24,3 \quad r^2 = 0,242 \quad \text{Equação 4-36}$$

$$\eta^{500rpm} = -28,4 \cdot \mu_{ap} + 27,9 \quad r^2 = 0,903 \quad \text{Equação 4-37}$$

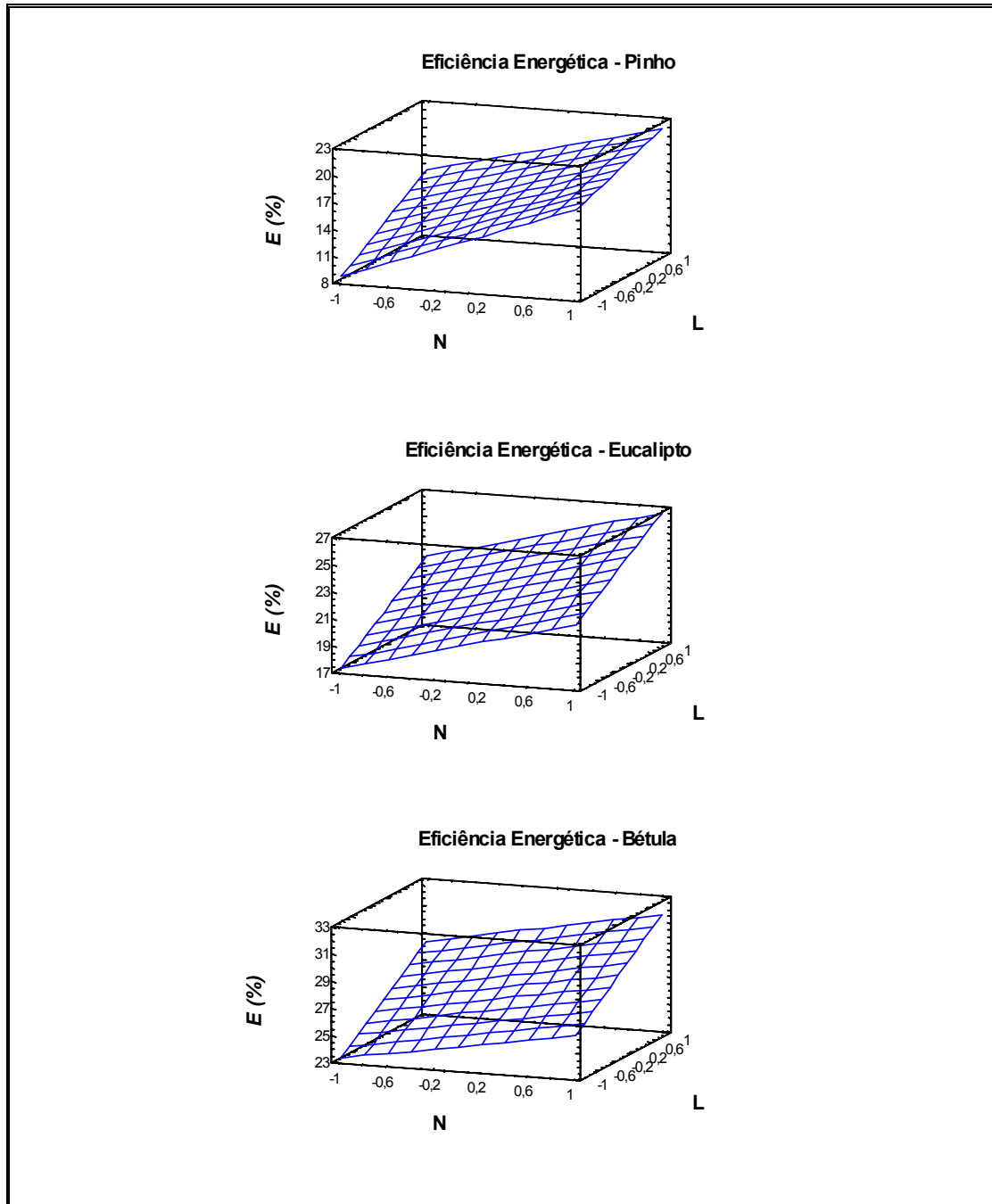
$$\eta^{600RPM} = -9,83 \cdot \mu_{ap} + 27,5 \quad r^2 = 0,267 \quad \text{Equação 4-38}$$

Relacionando os respectivos coeficientes com a frequência da rotação (rpm), obtêm-se a fórmula geral pretendida:

$$\eta = (1,70 \cdot 10^{-3} \times \Omega^2 - 1,68 \times \Omega + 3,88 \cdot 10^2) \cdot \mu_{ap} + (-1,95 \cdot 10^{-4} \times \Omega^2 + 2,11 \cdot 10^{-1} \times \Omega + 28,9) \quad \text{Equação 4-39}$$

Os fracos coeficientes de correlação obtidos tornam no entanto evidente que estas fórmulas servirão apenas de suporte a uma análise qualitativa dos factores envolvidos. Observa-se assim que a tendência observada é que os aumentos no entreferro reduzem a eficiência energética, assim como os aumentos na viscosidade aparente. Uma hipótese que se poderá avançar é que os aumentos no entreferro conduzem a uma diminuição da eficiência da transmissão da energia do movimento do rotor no entreferro, o que leva a uma diminuição do rendimento do equipamento.

Esta hipótese é consubstanciada pela equação 4-14 a 4-17, aonde se verifica que aumentos no entreferro a velocidade de rotação constante conduzem a aumentos na tensão tangencial.



Gráficos 4-15 Rendimento energético do refinador Valley (%).

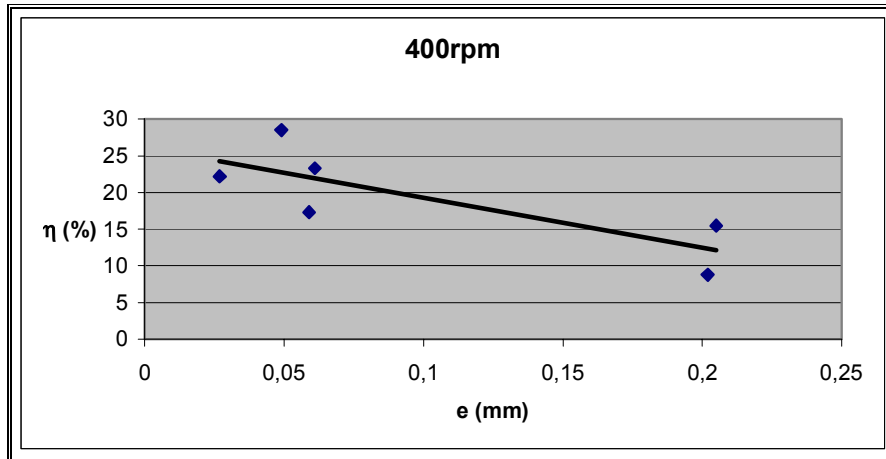


Gráfico 4-16 Relação entre η (%) e e (mm) a 400rpm.

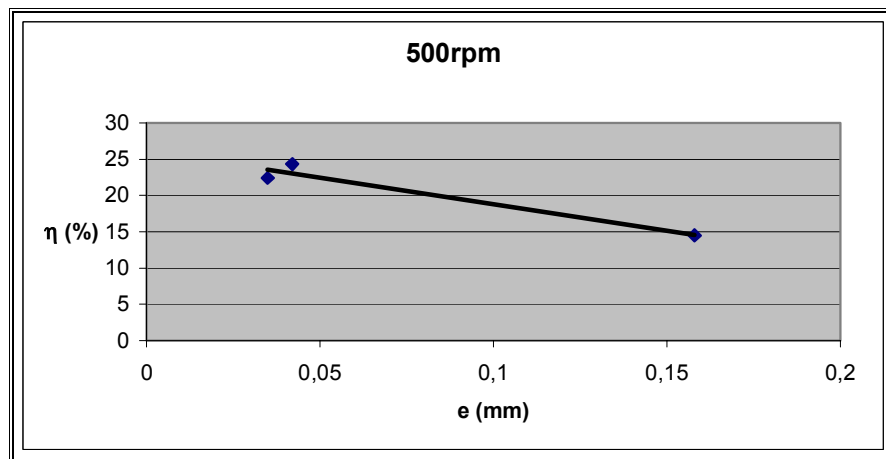


Gráfico 4-17 Relação entre η (%) e e (mm) a 500RPM.

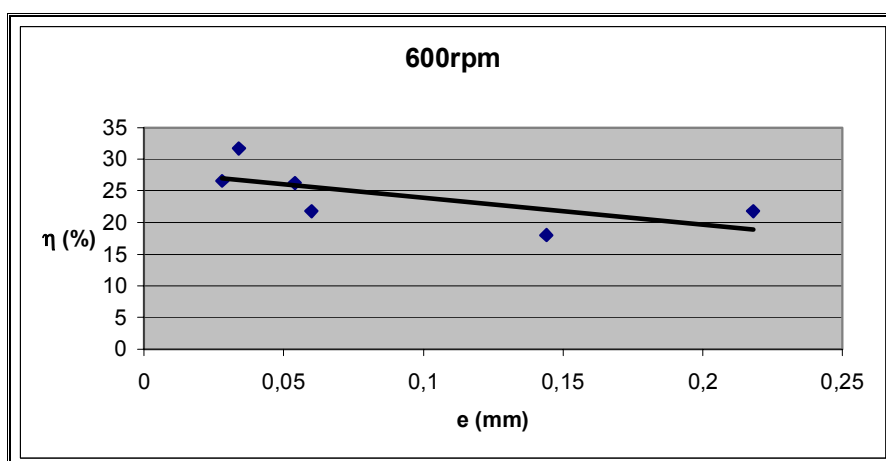


Gráfico 4-18 Relação entre η (%) e e (mm) a 600rpm.

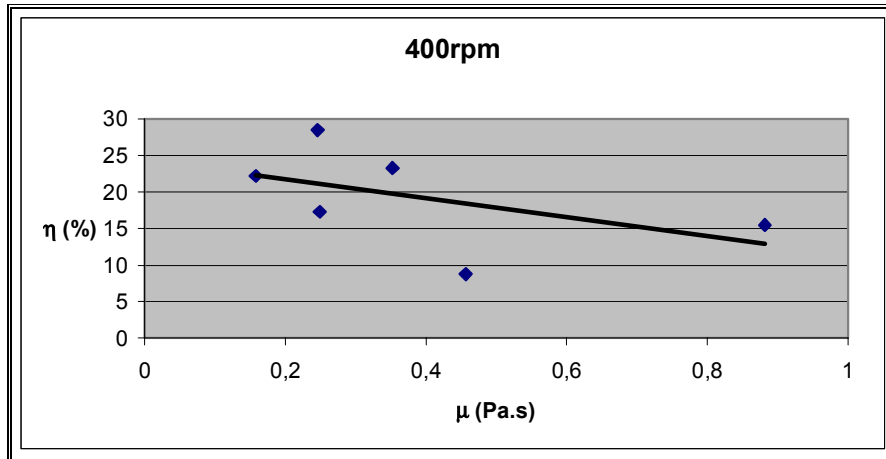


Gráfico 4-19 Relação entre η (%) e μ_{ap} (Pa.s) a 400rpm.

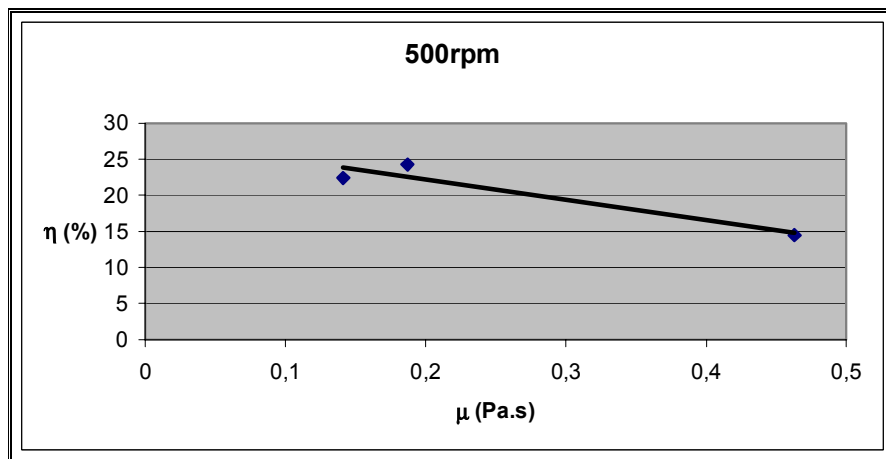


Gráfico 4-20 Relação entre η (%) e μ_{ap} (Pa.s) a 500rpm.

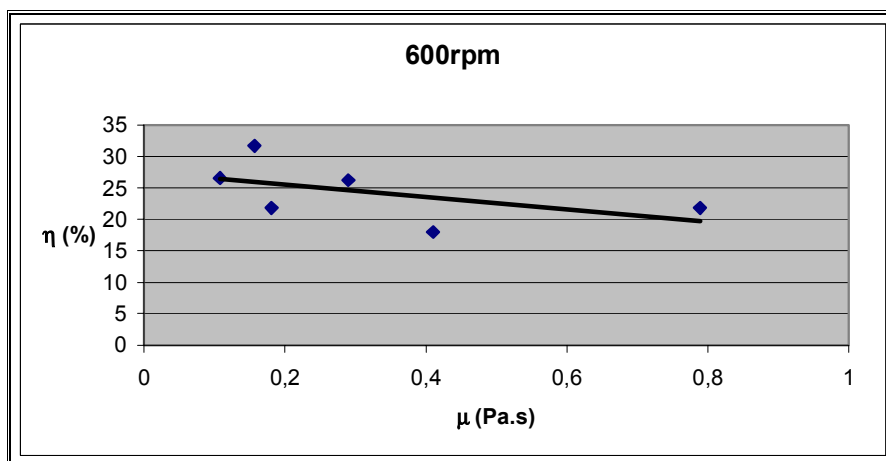


Gráfico 4-21 Relação entre η (%) e μ_{ap} (Pa.s) a 600rpm.

4.6. Conclusões sobre o comportamento hidromecânico das pastas

Podem-se extrair as seguintes conclusões básicas sobre o comportamento hidromecânico das pastas no refinador Valley:

1. Os parâmetros medidos durante o funcionamento do refinador Valley, que são a energia específica de refinação (EER) assim como N e L permitem avaliar as acções da máquina sobre a pasta em termos de forças exercidas, do coeficiente de fricção, do gradiente de velocidade, da absorção da energia útil e do rendimento energético da operação. Os valores dos rendimentos energéticos do refinador Valley são comparáveis a equipamentos como o refinador Voith com uma capacidade de 1kg de pasta seca.
2. É possível estimar-se a viscosidade aparente da pasta e as suas variações em função do gradiente de velocidade no entreferro. Confirma-se ainda que a pasta de papel tem um comportamento reofluidificante e que a viscosidade aparente da pasta diminui com o progresso da refinação. A viscosidade aparente da pasta também pode ser estimada como uma função do valor do entreferro e da velocidade de rotação do rotor, que são variáveis operacionais do equipamento. Da mesma forma, pode-se estabelecer uma relação entre a tensão tangencial exercida no entreferro e aquelas variáveis.
3. A hipótese de partida de que a potência líquida ao longo do ciclo de refinação é praticamente constante é suportada pelos valores experimentais. Isto significa que os aumentos de G devido à redução do entreferro são na sua maior parte acomodados pela redução da viscosidade aparente.
4. A influência da velocidade de rotação e da carga sobre a viscosidade da suspensão no seio do entreferro permite diferenciar o comportamento das pastas: a resinosa, o eucalipto e a bétula apresentam propriedades reológicas em suspensão diversas, no refinador Valley laboratorial.
5. O rendimento energético no Valley é uma função do valor do entreferro e da velocidade de rotação. É também possível relacionar esta variável com a viscosidade aparente e a frequência do rotor.

5. Análise das Propriedades da Pasta

5.1. Grau de refinação SR e drenabilidade DT

Grau de Refinação SR

A caracterização das pastas envolve a medição da resistência à drenagem da suspensão fibrosa. Os dois métodos mais comuns são o *Canadian Standard Freeness* (CSF) e o *Schopper-Riegler* (°SR). O método utilizado no presente trabalho foi este último, de acordo com a norma ISO 5267/1-1979. Neste teste, um litro de suspensão com uma consistência de $0,2\% \pm 0,002\%$ é filtrado através de uma teia num recipiente padronizado a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Quanto maior for a resistência à drenagem, maior é o valor expresso em °SR. Os resultados do teste dependem fortemente do teor em finos e da compressibilidade da pasta. Estes factores são determinados pela fibrilação da fibra, pela sua hidratação, flexibilidade, comprimento e grau de corte. Este ensaio sofre ainda influência da qualidade da água utilizada, tal como o seu pH, a sua condutividade e dureza. O CSF e o SR são números empíricos, não descrevendo o potencial da pasta em termos de propriedades de resistência ou a drenagem na mesa de formação da máquina de papel (Hiltunen, 1999, p.43). No entanto, estes números são frequentemente utilizados pela sua facilidade e rapidez de medição para avaliar o desenvolvimento das propriedades da pasta ao longo da refinação, ou seja o seu grau de refinação.

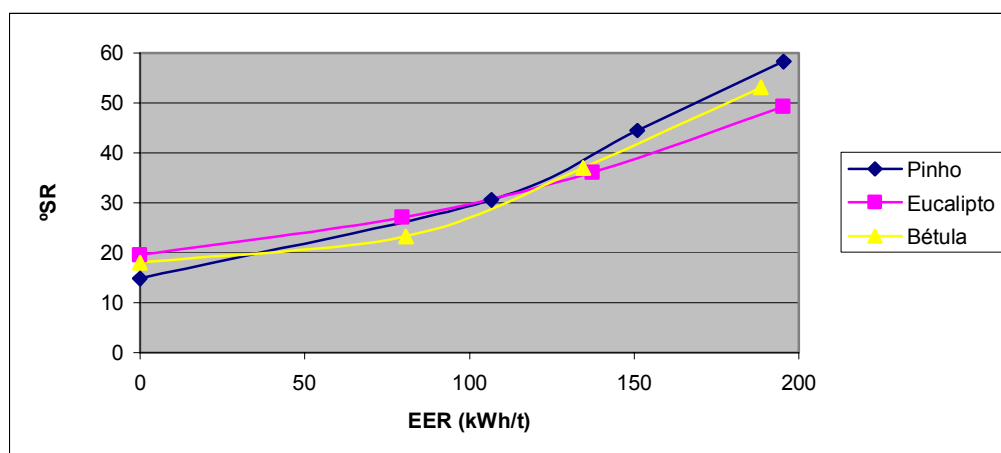


Gráfico 5-1 Grau de refinação em função da energia específica de refinação no ponto central.

O Gráfico 5-1 apresenta o grau de refinação em função da energia específica de refinação no ponto central para todas as matérias-primas. Pode-se distinguir claramente para cada uma delas a existência de duas zonas com declives diferentes separadas por um ponto de inflexão. A primeira zona corresponderá ao ataque da parede primária da fibra, sendo a segunda atribuível ao ataque à parede secundária. A mudança de declive mais acentuada ocorre na bétula, que inicialmente desenvolve lentamente e depois evolui muito acentuadamente. A mudança mais ténue ocorre no eucalipto.

As equações obtidas que descrevem o grau de refinação SR em função de velocidade de rotação N, da carga L e da energia específica de refinação E (kWh/t) são as seguintes:

$$GR_p = (-1,40 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 2,11 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (6,72 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 4,16 \times 10^{-2} \cdot E) \times L \\ + (1,69 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 1,91 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (7,80 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 7,25 \times 10^{-2} \cdot E + 15)$$

Equação 5-1

$$GR_E = (-1,64 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 2,37 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (-6,41 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 2,60 \times 10^{-3} \cdot E) \times L \\ + (-6,69 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 5,96 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (5,15 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 5,11 \times 10^{-2} \cdot E + 20)$$

Equação 5-2

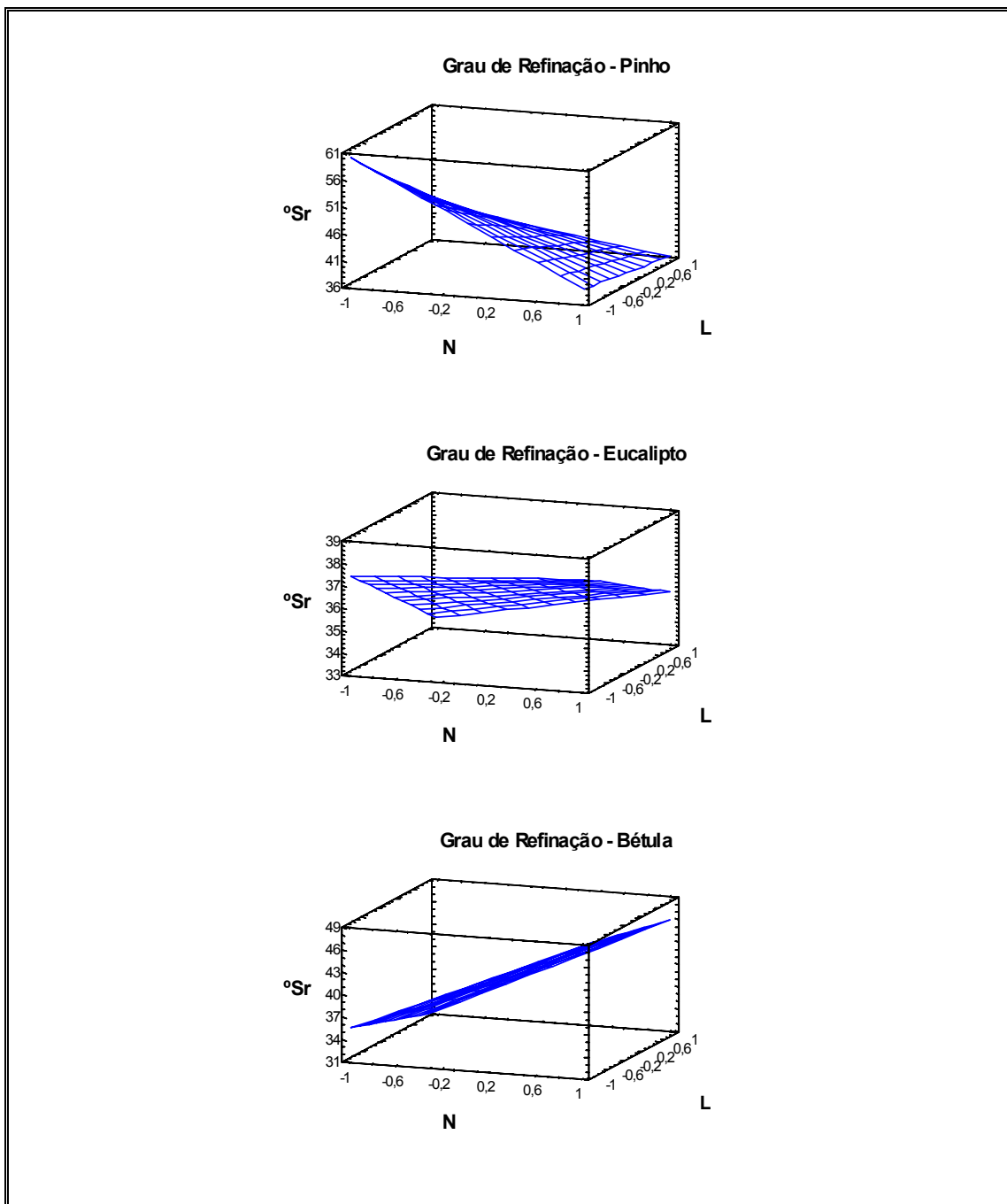
$$GR_b = (1,48 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 2,61 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (-3,80 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 6,11 \times 10^{-3} \cdot E) \times L \\ + (3,22 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 7,15 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (1,02 \times 10^{-3} \cdot E^2 - 3,13 \times 10^{-2} \cdot E + 18)$$

Equação 5-3

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

Estas equações estão representadas nos Gráficos 5-2 para o nível de energia específica de refinação E_2 . É possível observar que para o pinho os dois coeficientes em N e em L têm um valor negativo crescente. Assim pode-se concluir que o aumento da carga L para um determinado nível de energia específica de refinação diminui o grau de refinação SR; o mesmo pode ser afirmado em relação à velocidade de rotação. Observa-se ainda que o aumento da velocidade N tende para uma saturação do efeito de L no grau de refinação. O eucalipto apresenta um coeficiente em L negativo, o que significa que o aumento da carga provoca uma diminuição do grau de refinação (para

o mesmo nível energético). O factor em N é inicialmente positivo, tornando-se depois negativo de acordo com a equação de segundo grau na energia específica de refinação deste coeficiente. Por sua vez a bétula tem um coeficiente positivo em N e um coeficiente



Gráficos 5-2 Grau de Refinação em °SR, no nível de energia E2.

negativo em L. Assim, um aumento da velocidade de rotação provoca um aumento do grau de refinação, contrariamente às outras duas matérias-primas. O efeito da carga L tem o mesmo sinal das outras matérias-primas, mas é em cada nível cerca de quatro vezes menor que o efeito em N. Pode-se afirmar que o comportamento da bétula é praticamente o oposto ao do pinho. Em síntese, pode ainda afirmar que a sensibilidade do eucalipto às condições de refinação, sobretudo N, é consideravelmente inferior às da bétula e do pinho.

Tempo de Drenagem Tappi

O tempo de drenagem é também um indicador da drenabilidade de uma pasta, tal como o CSF e o SR, sendo considerado sobretudo como um indicador da resistência à filtração. Trata-se do tempo que um determinado volume de água demora a drenar durante a formação da folha no formador laboratorial nas condições normalizadas TAPPI T221 om-93. O tempo de drenagem depende do diferencial de pressão criado durante a drenagem e da temperatura da suspensão, do volume específico do bolo de pasta gerado sobre a teia de formação, i.e. da sua compressibilidade, e as propriedades da fibra; estas incluem o comprimento da fibra, a flexibilidade e o grau de intumescimento. O tempo de drenagem é muito importante, visto que a velocidade da máquina de papel é marcadamente influenciada pela drenagem.

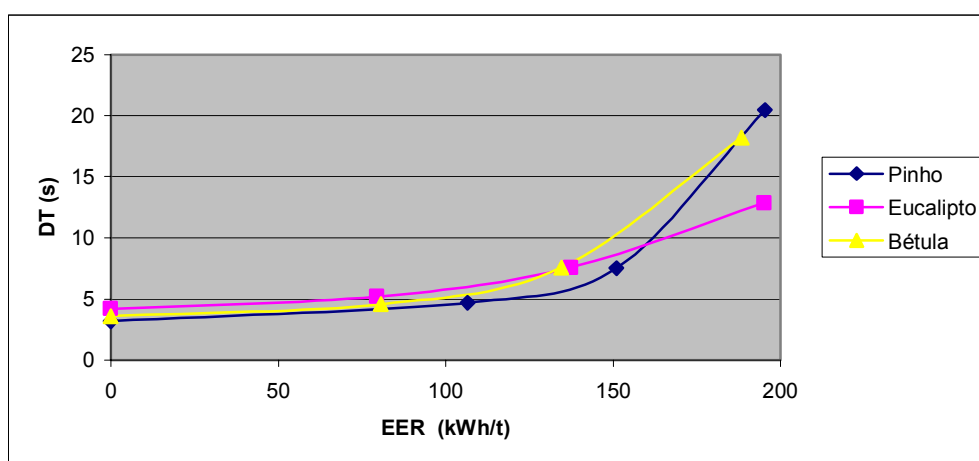


Gráfico 5-3 Tempo de drenagem em função da energia específica de refinação no ponto central.

O Gráfico 5-3 apresenta o tempo de drenagem em função da energia específica de refinação no ponto central. Aqui também as curvas obtidas apresentam um ponto de inflexão. Neste caso a mudança mais acentuada de declive ocorre para o pinho, sendo a mais suave novamente a da bétula.

As equações obtidas para o tempo de drenagem DT (s) em função de velocidade de rotação N , da carga L e da energia específica de refinação E (kWh/t) foram as seguintes:

$$DT_p = (-7,90 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 9,31 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (-7,54 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 8,94 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (7,66 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 9,15 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (9,54 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,03 \times 10^{-1} \cdot E + 3,39)$$

Equação 5-4

$$DT_E = (-6,96 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,52 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (-4,04 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 4,61 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (2,77 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 3,30 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (3,01 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,52 \times 10^{-2} \cdot E + 4,26)$$

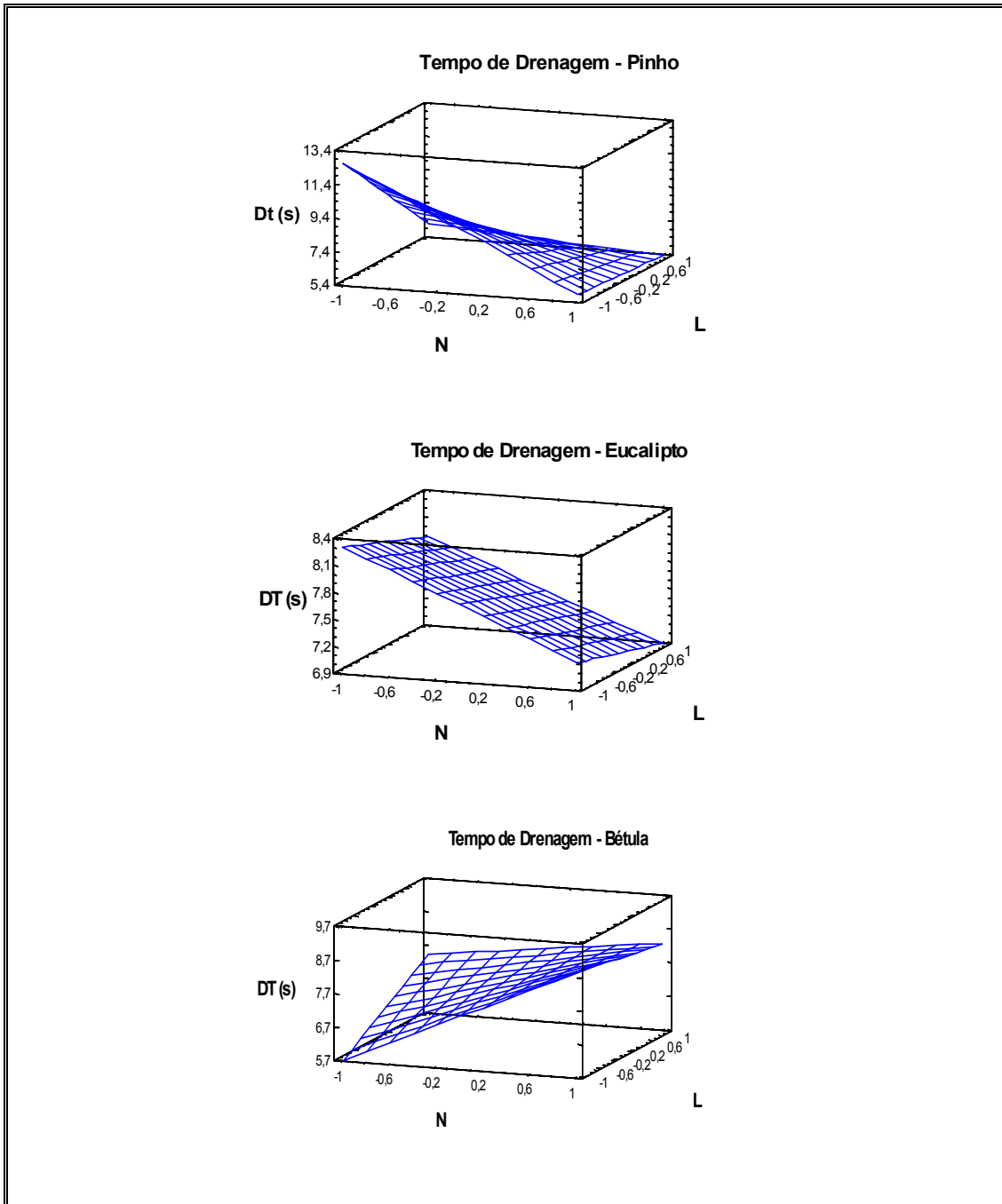
Equação 5-5

$$DT_B = (1,96 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,60 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (5,00 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 5,11 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (-1,72 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 1,67 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (7,09 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 5,93 \times 10^{-2} \cdot E + 3,81)$$

Equação 5-6

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

Os Gráficos 5-4 apresentam o tempo de drenagem das diferentes matérias-primas em função de N e de L no nível de energia E_2 . O tempo de drenagem no caso do pinho possui coeficientes negativos crescentes, embora com um factor de interacção elevado. Desta forma parece que aumentos na velocidade de rotação N ou da carga L provocam uma diminuição no tempo de drenagem. No caso do eucalipto o factor dominante é N , o que significa que o tempo de drenagem é essencialmente determinado pela velocidade de rotação. Este factor é negativo e de valor absoluto crescente, o que leva a que o tempo de drenagem diminua com o aumento de N . O coeficiente em L começa por ser positivo e depois torna-se crescentemente negativo, obedecendo à equação em segundo grau na energia específica de refinação. N também é o factor dominante no caso da bétula, sendo no entanto positivo; este facto significa que aumentos na rotação causam aumentos no tempo de drenagem. Por sua vez L começa por ser negativo e torna-se crescentemente positivo, de acordo com a equação



Gráficos 5-4 Tempo de Drenagem (s) no nível de energia E2.

de segundo grau na energia específica de refinação; o factor de interacção é aqui significativo. Em síntese, pode-se afirmar que o comportamento do tempo de drenagem no caso do pinho e da bétula é análogo ao do grau de refinação, ao passo que para o eucalipto a tendência é a mesma mas mais acentuada. Comparando os resultados do grau de refinação SR e o tempo de drenagem DT, pode-se constatar que

estes são análogos para no caso do pinho e da bétula; diferenças ocorrem para o eucalipto, o que deverá ser objectivo de estudo futuro.

5.2. Grau de hidratação

O WRV³¹ mede a percentagem de humidade retida por um bolo de fibras após estarem sujeitas durante quinze minutos a uma aceleração de 3000 g. Trata-se da razão entre a massa da água retida e a massa seca da fibra, normalmente expressa em percentagem. O WRV é assim um indicador da capacidade da fibra e da pasta de reterem a água, tratando-se de um bom índice para avaliar a resposta da fibra à refinação. No entanto, depende de parâmetros como o teor em sais, o pH e a temperatura (Hiltunen, 1999, p.46).

De acordo com Silvy, Saret e Jestin (1964), o WRV pode ser decomposto em duas componentes, de acordo com a fórmula:

$$WRV = WRV_{Intrafibra} + WRV_{Extrafibra} \quad \text{Equação 5-7}$$

O WRV_{Intrafibra} tem em conta a componente da água retida no interior da fibra. Este valor representa o grau de hidratação da fibra e está relacionado com o grau de intumescimento das fibras e logo com a sua plasticidade; explica assim uma parte do seu potencial de ligação. O WRV_{Extrafibra} exprime a quantidade de água retida no exterior da fibra por capilaridade na estrutura fibrosa e nos finos. Representa cerca de 18-20% do WRV total e está correlacionado com as propriedades de drenagem.

A determinação do WRV_{Intrafibra} pode ser determinado utilizando a fracção de fibras na ausência de finos (Silvy, Romatier e Chiodi, 1968). Esta foi a metodologia seguida na análise das pastas ensaiadas neste trabalho. Assim, foram centrifugadas amostras com cerca de 0,2 gramas de pasta retida no crivo de 140 mesh do classificador Bauer-McNett.

As equações obtidas para o WRV_{Intrafibra} em função de velocidade de rotação N , da carga L e da energia específica de refinação E (kWh/t) foram as seguintes:

$$WRV_p = (2,21 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 6,30 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (9,29 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 2,48 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (1,54 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (-9,39 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 4,26 \times 10^{-1} \cdot E + 87,0)$$

Equação 5-8

³¹ WRV: Water Retention Value. Veja-se a nota de rodapé 28 na página 64.

$$WRV_E = (-2,56 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 2,09 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (-1,32 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 2,01 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (4,85 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 3,53 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (2,05 \times 10^{-1} \cdot E + 80,9)$$

Equação 5-9

$$WRV_B = (2,92 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (8,01 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 1,76 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (1,11 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,41 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (-4,32 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 3,10 \times 10^{-1} \cdot E + 80,1)$$

Equação 5-10

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 5-5 apresenta o WRV em função da energia específica de refinação no ponto central. Pode-se constatar que para cada nível de energia específica de refinação o WRV do pinho é claramente superior aos do eucalipto e da bétula. Tal facto poderá dever-se às características do pinho e também às condições mais suaves de refinação, com uma menor tensão normal e um menor coeficiente de fricção em relação às outras matérias-primas (veja-se o subcapítulo 4.1, p.75). Observa-se no pinho duas zonas de declives diferentes, o que significa que ocorre uma redução da velocidade de evolução do WRV. As linhas de evolução do eucalipto e da bétula estão próximas entre si, estando no entanto a da bétula situada acima; tal significa maiores valores de WRV para uma dada energia específica de refinação, o que poderá dever-se ao maior teor de hemicelulose desta última matéria-prima.

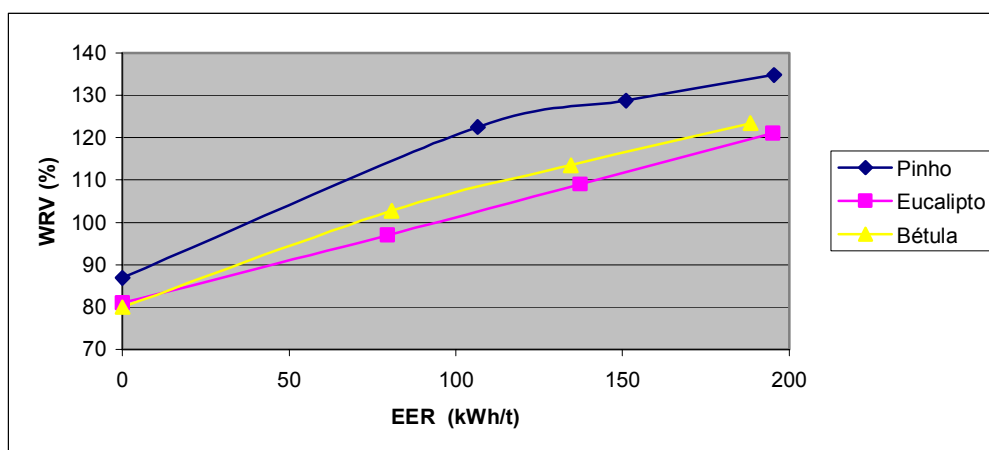
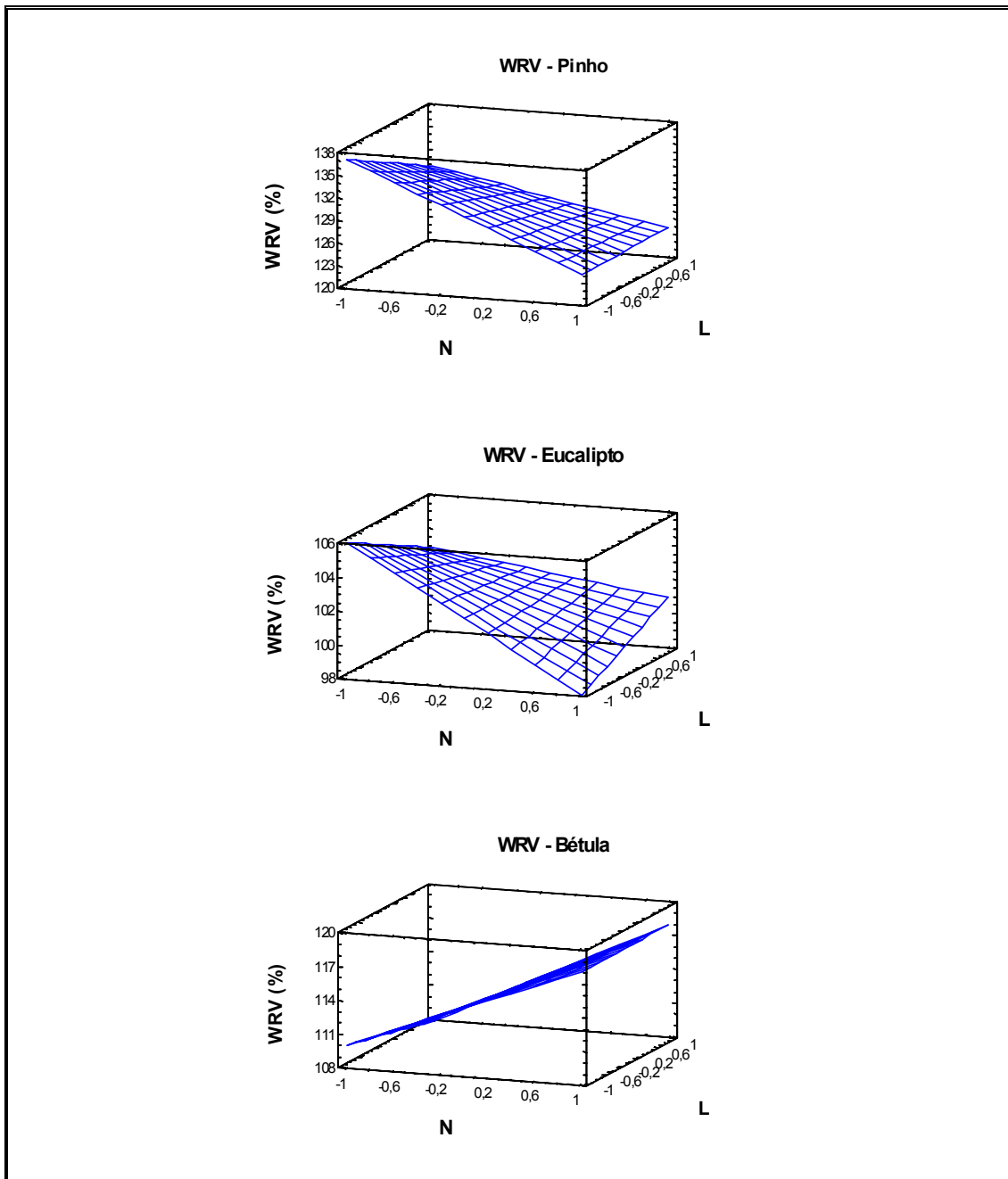


Gráfico 5-5 WRV_{IntraFibra} em função da energia específica de refinação no ponto central.



Gráficos 5-6 Grau de Hidratação WRV (%) no nível de energia E2.

Os Gráficos 5-6 apresentam o grau de hidratação WRV (%) no nível de energia E2 para as três matérias-primas. Nos três casos estudados constata-se que o factor dominante em relação à evolução do WRV é a velocidade de rotação N. O pinho e o eucalipto possuem um factor de sinal negativo, o que significa uma redução do WRV com o aumento de N. Já a bétula apresenta um factor em N positivo, o que significa que ocorre um aumento do WRV com o aumento de N. O factor L no caso do pinho e da bétula apresentam um sinal negativo, e o caso do eucalipto inicialmente

é positivo mas depois torna-se crescentemente negativo. No entanto, o efeito do factor L é absorvido pelo efeito da interacção, o que se reflecte em diferentes comportamentos do factor L a diferentes níveis de N. Em resumo, o aumento da velocidade de rotação N não é favorável para o desenvolvimento do WRV do pinho e do eucalipto, contrariamente à bétula. O efeito da carga L é secundário em relação a N, excepto para o eucalipto a velocidades elevadas; neste caso o aumento da carga tem um efeito favorável. O comportamento do WRV é globalmente consistente com os comportamentos do grau de refinação SR e o tempo de drenagem; a excepção é o eucalipto, com evoluções de SR nem sempre esperadas.

5.3. Comprimento da fibra

As equações obtidas para o comprimento aritmético médio das fibras (mm) fornecidas pelo aparelho *Morfi* em função de velocidade de rotação N, da carga L e da energia específica de refinação E (kWh/t) foram as seguintes:

$$L_p = (9,68 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 3,98 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (1,04 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 1,44 \times 10^{-4} \cdot E) \times L \\ + (8,67 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 2,22 \times 10^{-4} \cdot E) \times N \times L + (-1,30 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 1,56 \times 10^{-3} \cdot E + 1,150)$$

Equação 5-11

$$L_E = (-8,37 \times 10^{-8} \cdot E^2 + 2,40 \times 10^{-5} \cdot E) \times N + (2,28 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 4,98 \times 10^{-5} \cdot E) \times L \\ + (-3,51 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 1,53 \times 10^{-4} \cdot E + 0,667)$$

Equação 5-12

$$L_B = (-1,45 \times 10^{-5} \cdot E) \times N + (-1,94 \times 10^{-8} \cdot E^2 - 1,14 \times 10^{-5} \cdot E) \times L \\ + (-5,78 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 1,27 \times 10^{-4} \cdot E + 0,743)$$

Equação 5-13

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 5-7 apresenta o comprimento aritmético da fibra em função energia específica de refinação no ponto central. O efeito mais notório é o aumento da velocidade de corte do pinho para valores de EER superiores 140kWh/t, que se reflecte num aumento do declive da linha de evolução do comprimento da fibra. Tal facto poderá corresponder ao início do ataque da parede secundária da fibra, por delapidação global da parede primária. Essa hipótese exigirá estudo suplementar. O efeito da refinação para o eucalipto e a bétula é naturalmente menos notório, devido ao menor comprimento da fibra.

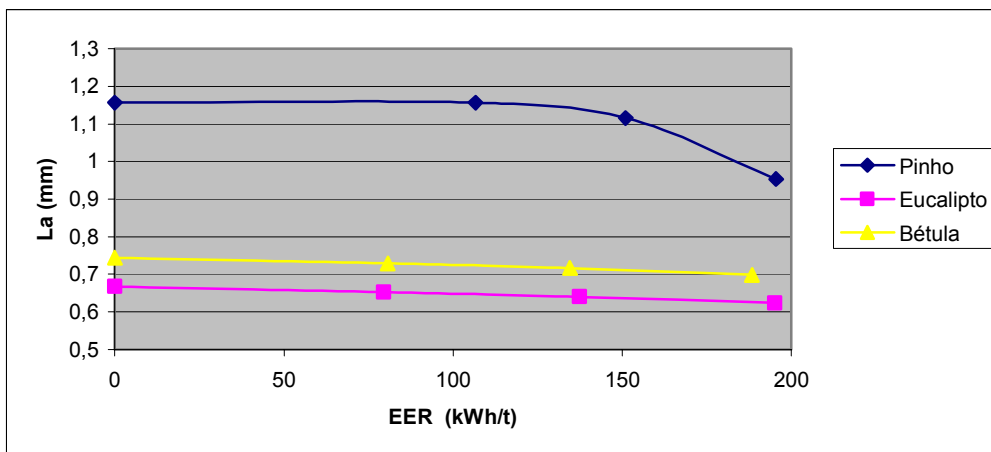
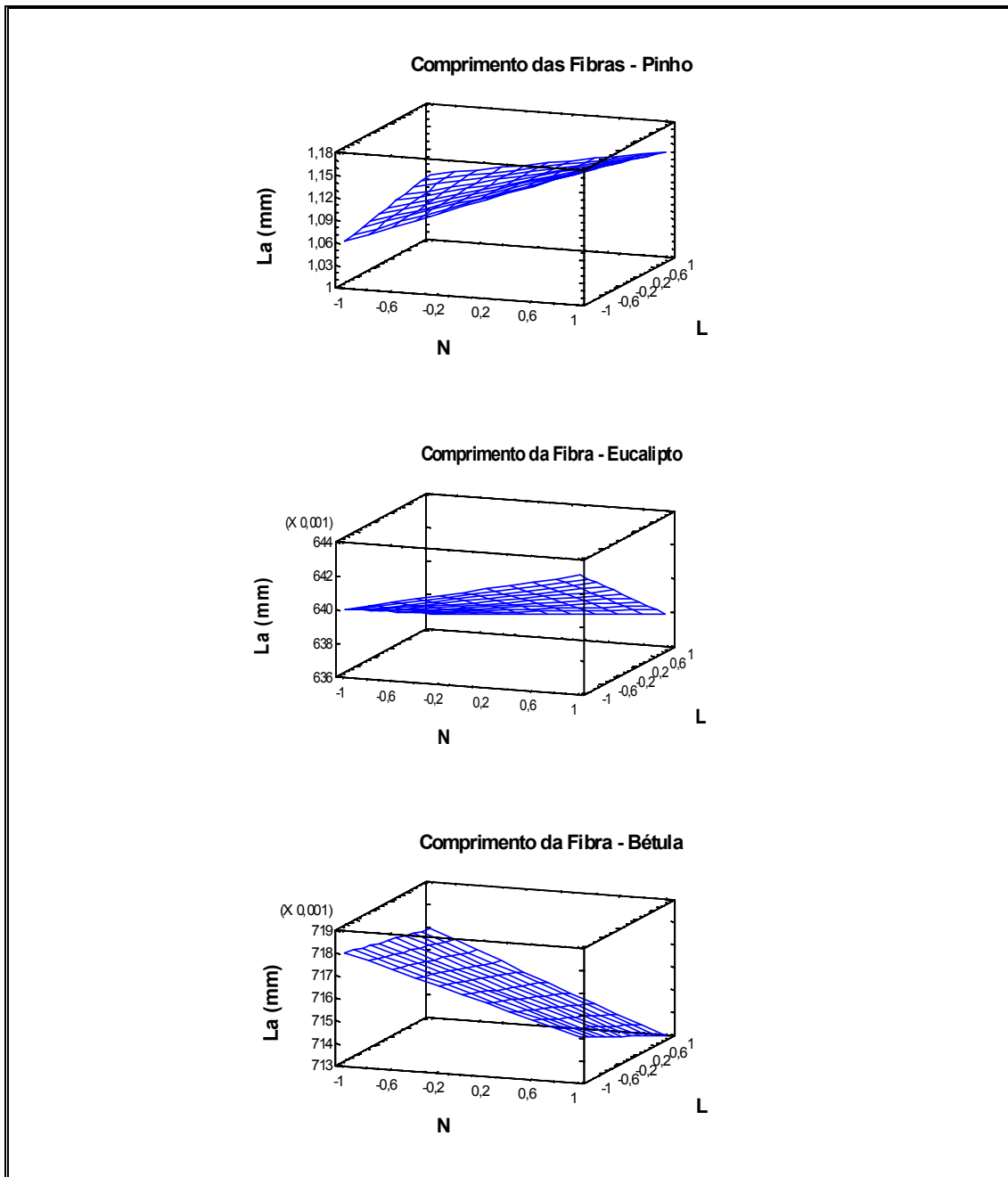


Gráfico 5-7 Comprimento aritmético da fibra em função energia específica de refinação no ponto central.

Os Gráficos 5-8 apresentam o comprimento da fibra no nível de energia E2 para as diferentes matérias-primas. No caso do pinho o factor com influência dominante é a velocidade de rotação N. O coeficiente dessa variável apresenta um valor positivo, o que significa que aumentos na velocidade de rotação N conduzem a um maior comprimento da fibra; desta forma há um menor efeito de corte para velocidades elevadas nesta gama de operação. O efeito de L só começa a ser visível de forma consistente no pinho no terceiro nível de energia, apresentando então um coeficiente positivo; diminui assim o efeito de corte com aumento na carga L. O eucalipto também apresenta um coeficiente em N positivo, o que resulta num menor efeito de corte a maiores velocidades. O efeito em L é negativo, embora vá reduzindo o seu efeito com o progresso da refinação, resultando num efeito de corte crescente com a carga L. Finalmente, a bétula apresenta coeficientes negativos em N e em L; apresenta assim um comportamento inverso das outras matérias-primas em relação a N, sendo o corte no caso da bétula maior a velocidades mais elevadas. Tem no entanto um comportamento similar ao eucalipto em termos da carga, ocorrendo um maior corte em cargas mais elevadas. Fazendo uma análise global, parece que valores fortes de N provocam um efeito de saturação para o pinho; não ocorrem aumentos adicionais do efeito de corte. Por sua vez na bétula ocorre um aumento acentuado do efeito de corte com o aumento da velocidade de rotação N, contrariamente ao observado no pinho e no eucalipto. Os efeitos de N e de L no comprimento da fibra (Gráficos 5-8) parecem ser análogos aos observados para os respectivos coeficientes de fricção

(Gráficos 4-3) e valor do entreferro inicial (Gráficos 4-5). Parece assim haver uma relação entre estas variáveis de operação no refinador e o efeito de corte nas fibras.



Gráficos 5-8 Comprimento aritmético da fibra (mm) no nível de energia E2.

5.4. Resistência da fibra

Muitos autores efectuaram estudos em que se realizavam testes de tracção em fibras individuais (Mark e Gillis, 1983, p.445-460), tendo como objectivo relacionar as propriedades das fibras com as propriedades dos papéis. No entanto estes testes são muito difíceis e bastante demorados; apresentam ainda algum enviesamento estatístico, já que as fibras de melhor qualidade têm mais probabilidade de serem escolhidas (Levlin, 1999, p.148). Destaca-se ainda o estudo de Page e El-Hosseiny (1972; 1983), aonde se atribui a resistência à tracção das fibras a dois factores. O factor primordial é o ângulo das fibrilas da parede secundária S_2 , que determina completamente as diferentes resistências entre espécies e tipos de fibras; assim, quanto maior for o alinhamento das fibrilas com o eixo da fibra, maior é a sua resistência à tracção. Como factor secundário surgem os defeitos nas fibras, sejam naturais (*pits*³²), sejam induzidos pelos processos de produção da pasta e do papel (nódulos e pregas).

A resistência à tracção num ensaio com garras a uma distância nula³³ serve de parâmetro de avaliação da resistência intrínseca da fibra (Cowan, 1991; Levlin, 1999, p.148), isolando o efeito da ligação e da estrutura do papel; no entanto, este facto tem suscitado algum debate (Johnson, Bennet e Montrey, 1983, p.169). Assim, Clark nos anos 40 e Van den Akker em 1958 consideraram que o valor do *zero-span* era uma medida válida da resistência da fibra. Page (1969) desenvolveu uma expressão relacionando o valor do *zero-span* com a resistência à tracção do papel. Silvy (1980) estabeleceu a relação entre o valor do *zero-span* e a resistência intrínseca da fibra, utilizando a teoria do poro equivalente para entrar em conta com a orientação das fibras na folha de papel. No entanto, autor demonstra o interesse de realizar o teste saturado de água, de forma a anular as tensões nas fibras e nas suas ligações resultantes da secagem da folha de papel. Cowan (1991) apresenta numa monografia um modelo em que relaciona o valor de *zero-span* com uma função probabilidade que determina a fracção de fibras seguramente presas nas duas garras, que contempla um factor relacionado com o grau de afastamento da orientação global das fibras do eixo em que é exercida a tracção e com a resistência axial das fibras. Cowan também

³² *Pits* são orifícios na parede celular dos traqueídeos das resinosas e nos vasos das folhosas.

³³ Este teste é normalmente conhecido por *zero span tensile*.

considera como valor representativo da resistência da fibra o valor do zero-span em húmido.

Os valores aqui estudados são relativos aos ensaios do *zero-span tensile* em húmido³⁴. Não se encontraram diferenças representativas dos efeitos de N e L sobre o *zero-span tensile*. Não obstante, foi possível verificar alguma evolução do valor do zero-span em húmido (Nm/g) com o nível de energia específica de refinação (kWh/t), de acordo com as fórmulas (veja-se o Gráfico 5-9):

$$ZS_p = -1,32 \times 10^{-3} \cdot E^2 + 3,49 \times 10^{-1} \cdot E + 126 \quad \text{Equação 5-14}$$

$$ZS_E = 3,64 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,50 \times 10^{-1} \cdot E + 143 \quad \text{Equação 5-15}$$

$$ZS_b = -3,21 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 4,73 \times 10^{-2} \cdot E + 116 \quad \text{Equação 5-16}$$

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

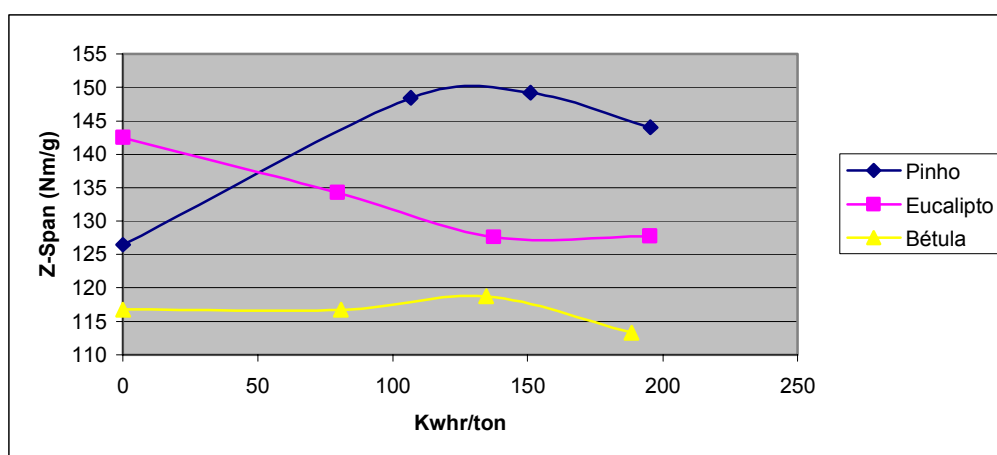


Gráfico 5-9 *Zero-span Tensile* da fibra em função da energia específica de refinação no ponto central.

No caso do pinho observa-se um aumento do zero-span até um patamar, seguido de uma pequena descida. O aumento inicial pode ser explicado pelo efeito de redução do encurvamento das fibras (Levlin, 1999, p.48); uma hipótese que por vezes tem sido colocada é o aumento do alinhamento das fibrilas resultante da hidratação das paredes da fibra, o que conduz ao aumento da sua resistência. A descida subsequente desse valor pode significar uma redução da resistência das fibras, já que

ocorre um aumento de finos e resíduos durante o progresso da refinação; esta hipótese vai ao encontro dos estudos de Thuvander, Gamstedt e Alhgren (2001). Nestes estudos os autores realizaram ensaios de tracção em fibras individuais de pastas Kraft de resinosas não branqueadas, medindo-se o alongamento das fibras durante o teste. Estudou-se igualmente a evolução da microestrutura das fibras ao longo da refinação. Verificou-se assim uma redução da ligação interfibrilar, com a consequente redução da capacidade de transferência de tensão entre fibrilas. Tal facto resultou numa redução da resistência e do alongamento das fibras.

No eucalipto também ocorre uma redução do *zero-span* até ao nível de energia E_2 , ocorrendo uma estabilização entre o nível E_2 e E_3 . No caso da bétula, os valores mantêm-se no mesmo nível, ocorrendo uma redução no nível E_3 . A hipótese da redução da resistência das fibras é igualmente válida para o eucalipto e para a bétula. Outra hipótese a estudar posteriormente será a possível relação destas diminuições do *zero-span* com aumentos no encurvamento nas fibras.

5.5. Flexibilidade da fibra

As medições do índice de flexibilidade foram efectuadas para todos os níveis de energia nas condições padrão O (5,5kg e 500RPM) e para as restantes condições (A, B, C e D) foram realizadas somente para o nível intermédio de energia E_2 .

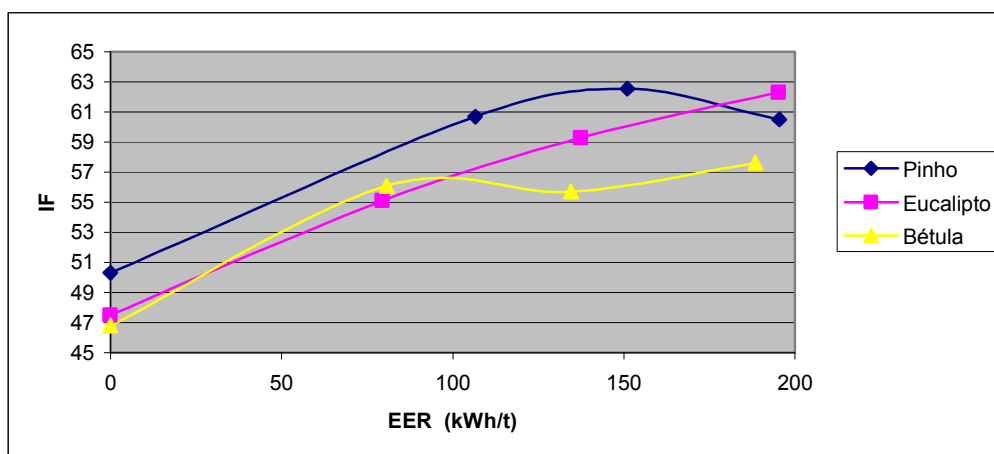


Gráfico 5-10 Índice de flexibilidade da fibra em função da energia específica de refinação no ponto central.

³⁴ No entanto, alguns autores (Seth e Chan, 1999) consideram que este valor é apenas representativo da resistência em húmido, sendo a resistência em seco o valor representativo do valor real da resistência intrínseca da fibra; no entanto, subsiste aqui o efeito do condicionamento da fibra durante a secagem.

Para o caso do pinho, a equação obtida para o índice de flexibilidade da fibra no ponto central O em função da energia específica de refinação (kWh/t) foi a seguinte:

$$IF_p^O = -5,43 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,60 \times 10^{-1} \cdot E + 50,2 \quad \text{Equação 5-17}$$

$$r^2 = 0,994$$

Por sua vez, a equação que relaciona o índice de flexibilidade do pinho no nível de energia E2 com a velocidade de rotação N e a carga L, tem a forma seguinte:

$$IF_p^{E2} = 0,10 \times N - 0,75 \times L + 1,40 \times N \times L + 62,6 \quad \text{Equação 5-18}$$

Para o eucalipto têm-se as fórmulas seguintes para a evolução do índice de flexibilidade no ponto central e para o índice de flexibilidade no nível de energia específica de refinação E₂ em função de N e de L:

$$IF_E^O = 2,69 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 7,15 \times 10^{-2} \cdot E + 47,5 \quad \text{Equação 5-19}$$

$$r^2 = 0,998$$

$$IF_E^{E2} = -0,68 \times N - 2,18 \times L - 0,30 \times N \times L + 59,3 \quad \text{Equação 5-20}$$

Finalmente, para a bétula têm-se respectivamente as fórmulas seguintes:

$$IF_B^O = -2,96 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 1,10 \times 10^{-1} \cdot E + 46,9 \quad \text{Equação 5-21}$$

$$r^2 = 0,971$$

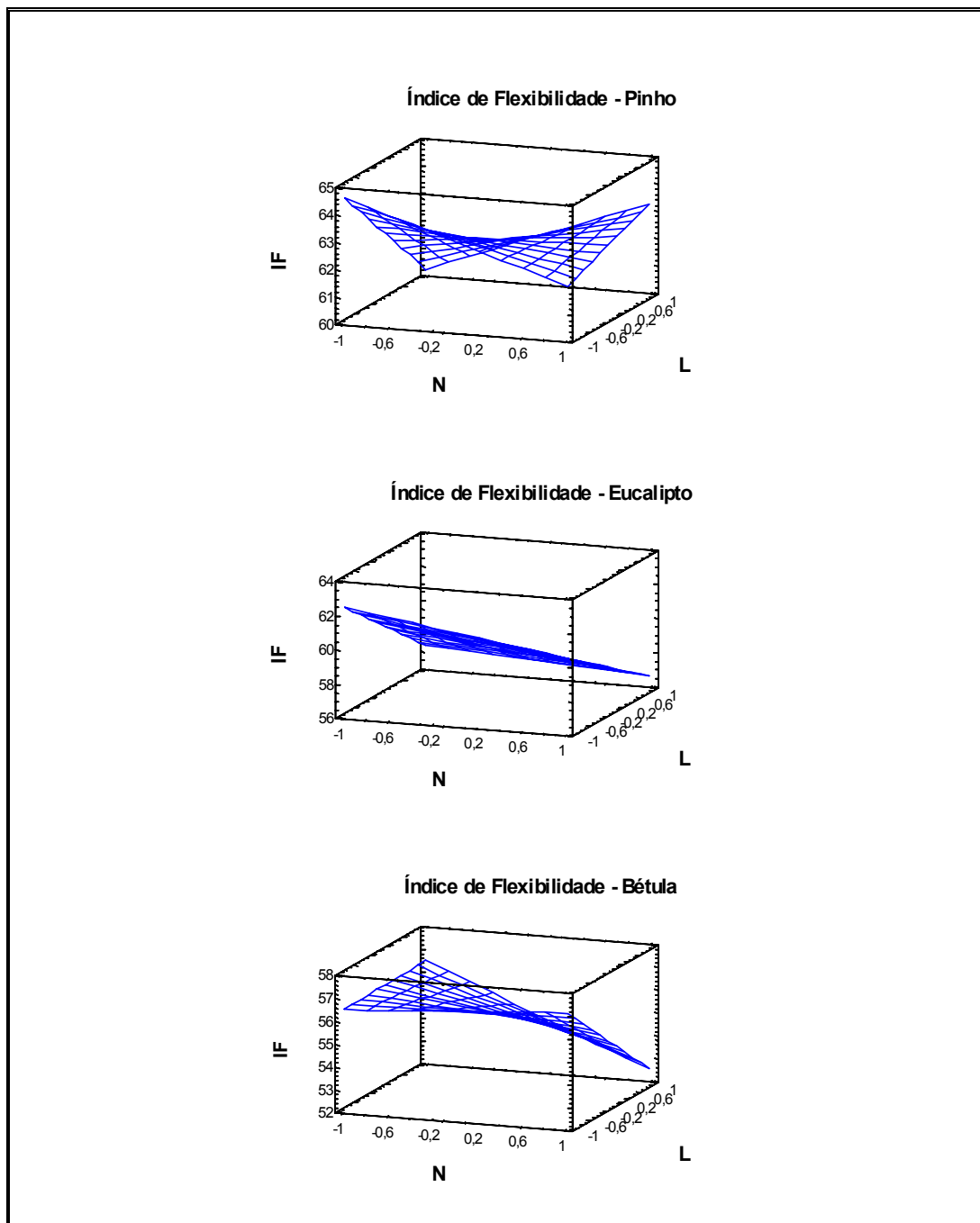
$$IF_B^{E2} = -0,85 \times N - 1,10 \times L - 1,15 \times N \times L + 55,7 \quad \text{Equação 5-22}$$

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste das expressões polinomiais 5-17, 5-19 e 5-21 estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

No Gráfico 5-10 apresenta-se o índice de flexibilidade da fibra em função da energia específica de refinação no ponto central para as diferentes matérias-primas. Da sua análise ressalta o facto de que a taxa de evolução da flexibilidade é análoga para os três casos no início da refinação. O pinho apresenta uma flexibilidade superior à da bétula e à do eucalipto; no entanto esta atinge um valor máximo e então diminui. O eucalipto apresenta uma evolução constante ao longo de toda a refinação. Por sua

vez, a bétula tem inicialmente uma evolução próxima daquela do eucalipto, atingindo entretanto a partir de E_1 um patamar após o qual a sua flexibilidade se mantém relativamente constante.

Nos Gráficos 5-11 pode observar-se índice de flexibilidade da fibra no nível de energia E_2 para as três matérias-primas. Quando se examina a influência da velocidade de rotação e da carga sobre a flexibilidade da fibra em húmido, constata-se



Gráficos 5-11 Índice de Flexibilidade da fibra no nível de energia E_2 .

para o pinho que o efeito dominante é o de interação; deste facto resulta que o efeito de N é diferente mediante o nível de L, o mesmo ocorrendo com o efeito L em relação a N. O valor máximo de flexibilidade é obtido na região com N e L no seu valor mínimo (N=-1 e L=-1). Outro máximo local para a flexibilidade, contudo de nível inferior, ocorre na região em que N=+1 e L=+1. No caso do eucalipto o factor dominante é a carga L, com um coeficiente cerca de três vezes superior a N; têm ambos um sinal negativo, o que significa que aumentos na velocidade de rotação N e aumentos na carga L provocam diminuições no índice de flexibilidade. Finalmente para o caso da bétula, os coeficientes em N e em L são negativos tal como ocorre para o eucalipto; no entanto aqui os efeitos de interação têm uma influência significativa. Assim, a conjugação destes efeitos conduzem a um mínimo local para (N=+1; L=+1); conduzem ainda a um patamar na região de (N=-1; L=-1), com máximos locais em (N=+1;L=+1) e outro de menor dimensão em (N=-1; L=+1).

5.6. Teor em macrofibrilas

O teor em macrofibrilas MF (%) aqui estudado é o fornecido pelo equipamento Morfi, de acordo com as definições anteriormente apresentadas.

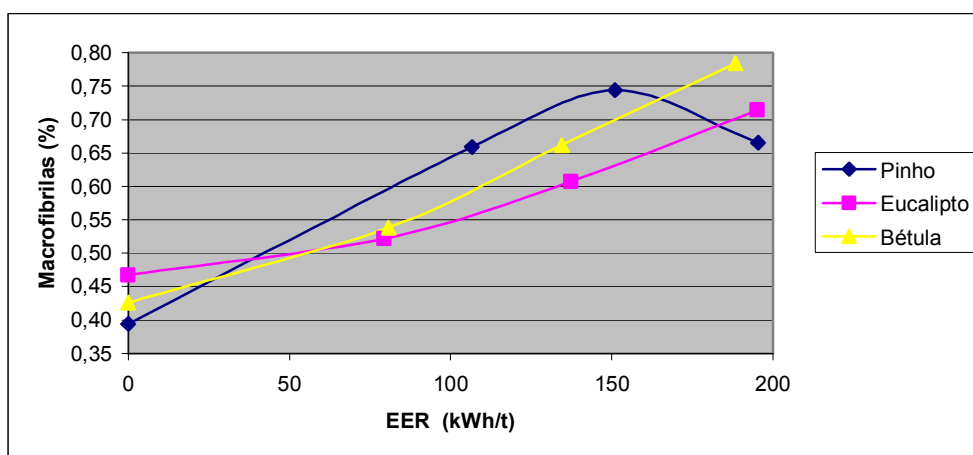


Gráfico 5-12 Teor em macrofibrilas na fibra em função da energia específica de refinação no ponto central.

As equações obtidas para a evolução do teor em macro fibrilas em função de velocidade de rotação N , da carga L e da energia específica de refinação E (kWh/t) são as seguintes:

$$MF_p = (9,99 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 6,55 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (-1,34 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 2,25 \times 10^{-4} \cdot E) \times L + (1,29 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 1,20 \times 10^{-4} \cdot E) \times N \times L + (-1,43 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 4,26 \times 10^{-3} \cdot E + 0,391)$$

Equação 5-23

$$MF_E = (-2,01 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,34 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (-4,81 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 1,56 \times 10^{-4} \cdot E) \times L + (6,27 \times 10^{-8} \cdot E^2 + 6,47 \times 10^{-6} \cdot E) \times N \times L + (4,71 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 3,56 \times 10^{-4} \cdot E + 0,467)$$

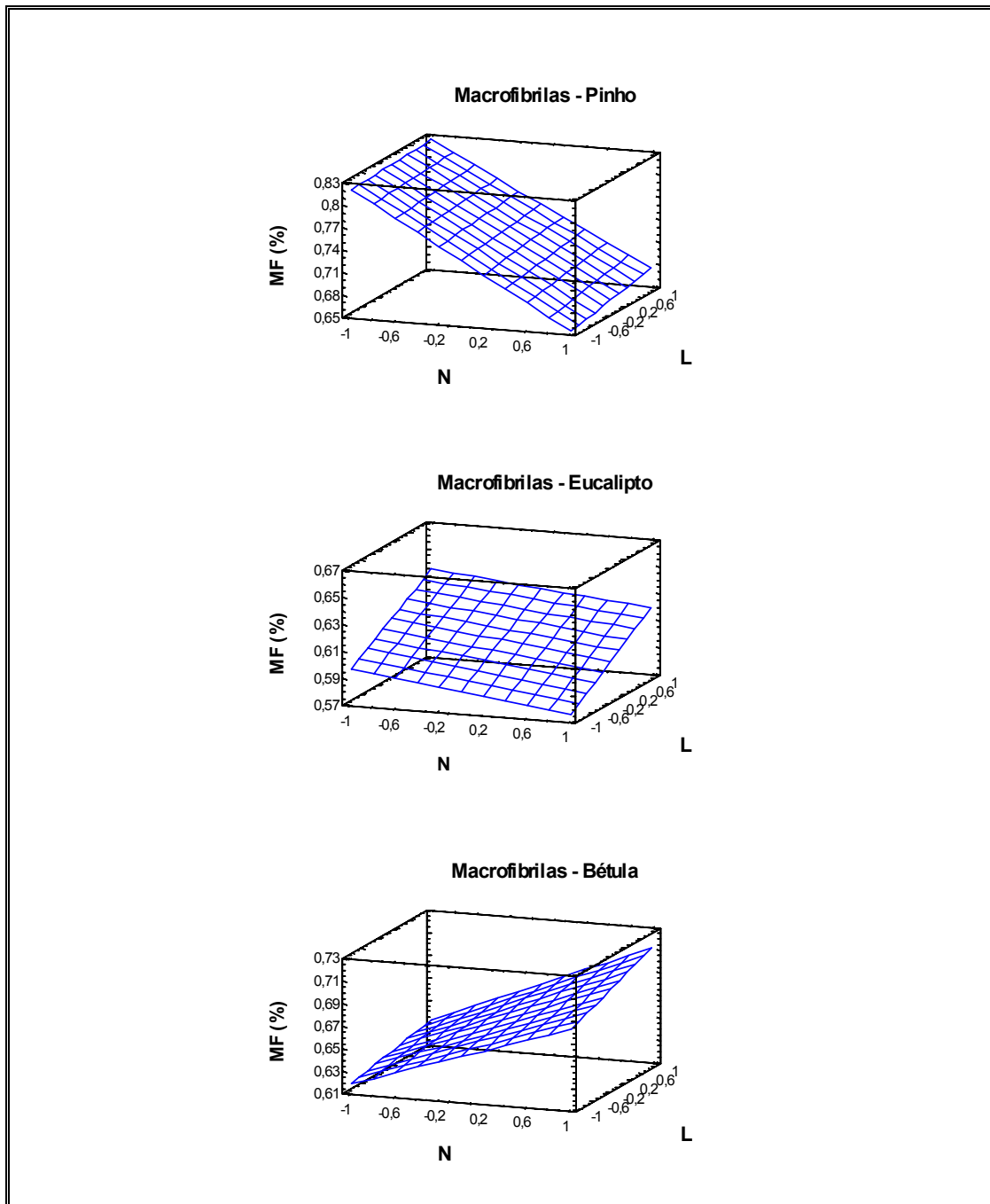
Equação 5-24

$$MF_B = (6,80 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 9,70 \times 10^{-5} \cdot E) \times N + (-4,37 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 1,55 \times 10^{-4} \cdot E) \times L + (6,51 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 9,24 \times 10^{-5} \cdot E) \times N \times L + (3,99 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,17 \times 10^{-3} \cdot E + 0,424)$$

Equação 5-25

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 5-12 apresenta o teor em macrofibrilas na fibra para as diferentes matérias-primas em função da energia específica de refinação no ponto central. O pinho apresenta até ao nível E_2 a maior taxa de progresso no teor de macrofibrilas, atingindo um máximo e então diminuindo aquele valor. Começa por ter inicialmente o menor teor em macrofibrilas, levando o progresso da refinação a ultrapassar rapidamente os valores da bétula e do eucalipto. Após atingir respectivo máximo, o que parece ocorrer é a perda daquelas macrofibrilas na forma de finos. Atendendo a que tempo de refinação para atingir um dado nível energético é manifestamente superior no caso do pinho (como se pode verificar no subcapítulo 3.4, na p.62), fica em aberto se o resultado experimental se fica a dever à suavidade da refinação (exibindo menor tensão tangencial e menor coeficiente de fricção, conforme explicitado no subcapítulo 4.1, p.75) ou é uma característica da matéria-prima. Por sua vez, o facto mais marcante da evolução do teor de macrofibrilas do eucalipto é a existência de um ponto de inflexão, ocorrendo então um aumento da velocidade de geração de macrofibrilas. Na primeira fase daquela evolução provavelmente ocorrerá um ataque da parede primária, mais resistente, acontecendo posteriormente um ataque à parede secundária. Finalmente, a bétula apresenta uma taxa de evolução constante ao longo da refinação, não se observando nesta qualquer ponto de inflexão.



Gráficos 5-13 Teor em Macrofibrilas no nível de energia E2.

Os Gráficos 5-13 apresentam por sua vez teor em macrofibrilas em função das diferentes condições operatórias N e L, para as diferentes matérias-primas e no nível de energia específica de refinação E₂. Da análise do teor em macrofibrilas do pinho, constata-se que o efeito dominante é a velocidade de rotação N; sendo o seu coeficiente negativo, os aumentos na velocidade de rotação provocam uma diminuição no teor em macrofibrilas. O eucalipto apresenta comportamentos

diferentes ao longo da evolução da refinação; no primeiro nível de energia E_1 não se evidencia qualquer efeito de N ou L, no nível E_2 o factor dominante é a carga L e no terceiro é a velocidade de rotação N. Para esta pasta o factor N apresenta coeficientes negativos, ao passo que L apresenta coeficientes positivos. A bétula apresenta, tal como pinho, como factor dominante a velocidade de rotação N, mas aqui tem-se um coeficiente positivo; o coeficiente em L é também positivo. Em sùmula, a carga parece favorecer a fibrilação externa, enquanto a velocidade parece ter efeitos variáveis. Deve-se salientar que os reduzidos valores obtidos para este índice, que são inferiores a 1%. Desta maneira, o teor em microfibrilas e as respectivas variações com as condições de refinação poderá por vezes ser de difícil interpretação.

5.7. Taxa de finos

Os valores para as taxas de finos aqui analisados foram obtidos no classificador P200 Bauer-McNett. No caso do pinho foram efectuados ensaios com a pasta não refinada e com todas as pastas refinadas nas diferentes condições dos três níveis de energia. Para a bétula e o eucalipto realizaram-se os ensaios relativos a todas as refinações no terceiro nível de energia e para as pastas não refinadas.

Apresentam-se assim para as três matérias-primas as equações que relacionam o teor de finos Bauer-McNett (%) com a velocidade de rotação N e a carga L no nível de energia E_3 :

$$TF_p = -1,40 \times N - 1,25 \times L + 1,00 \times N \times L + 10,6 \quad \text{Equação 5-26}$$

$$TF_E = -0,35 \times N + 1,45 \times L - 1,20 \times N \times L + 13,5 \quad \text{Equação 5-27}$$

$$TF_B = 0,35 \times N + 0,70 \times L - 0,35 \times N \times L + 10,9 \quad \text{Equação 5-28}$$

Os valores experimentais e as curvas de ajuste obtidas estão representadas no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 5-14 apresenta os teores de finos Bauer-McNett determinados em função da energia específica de refinação no ponto central. O pinho e a bétula apresentam a maior evolução do teor de finos, com um valor de cerca de 6% de crescimento dos respectivos teores. A bétula apresenta um valor de apenas cerca de 2% de evolução naquela taxa.

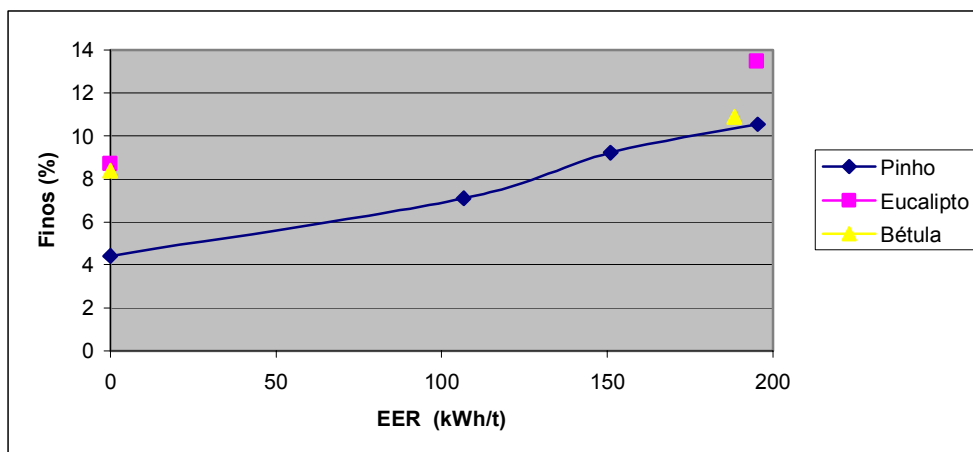
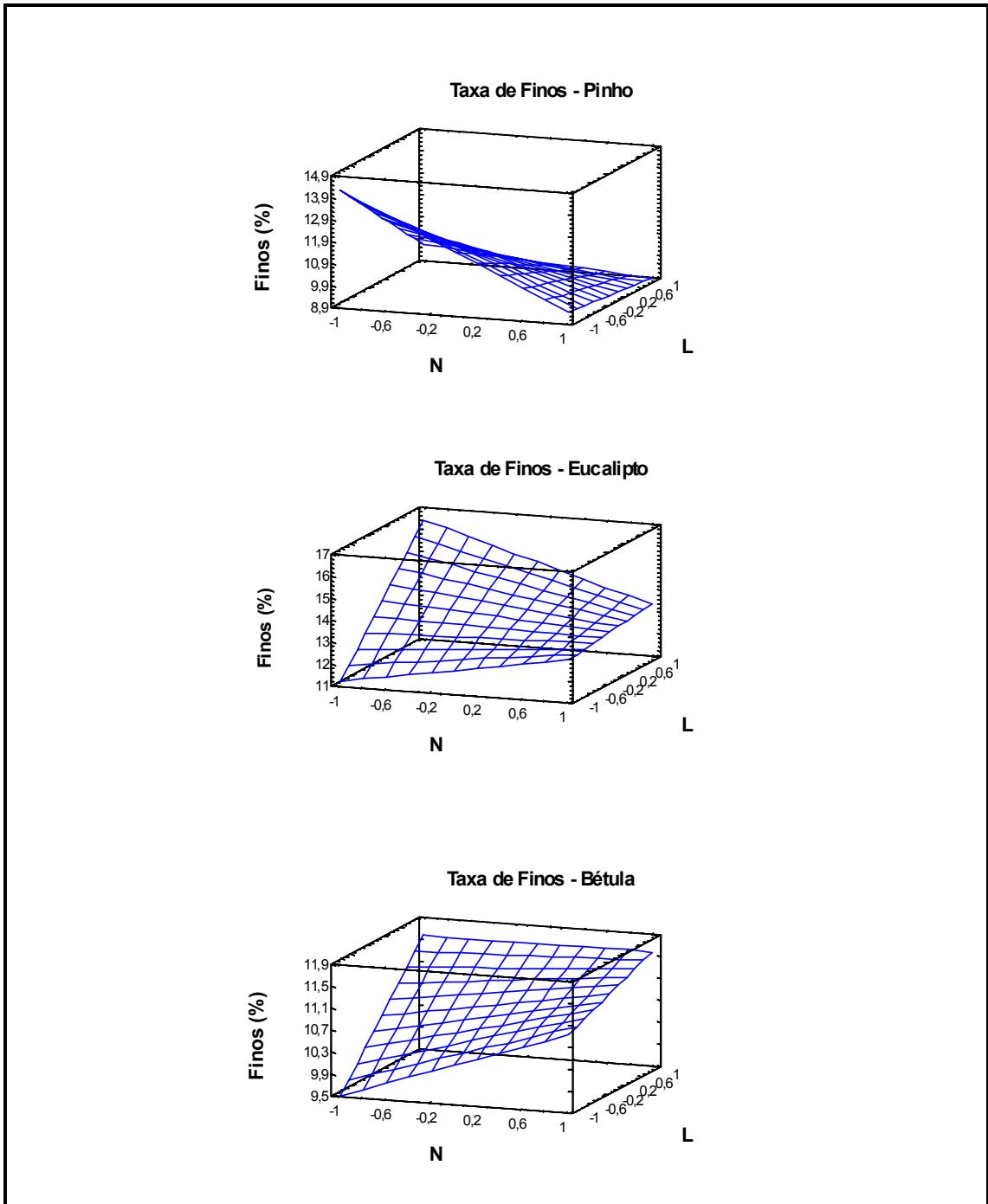


Gráfico 5-14 Taxa de finos P200 do Bauer-McNett em função da energia específica de refinação no ponto central.

Os Gráficos 5-15 apresentam a taxa de finos Bauer-McNett (%) no nível de energia E_3 para o pinho, o eucalipto e a bétula. Para o pinho, pode-se constatar que os coeficientes em N e em L são negativos, sendo o coeficiente de interação da mesma ordem de grandeza e de sinal contrário. Esta conjugação de coeficientes conduz a um valor máximo do teor de finos em $(N=-1; L=-1)$, ou seja nos respectivos valores mínimos. O valor mínimo do teor de finos ocorre em $(N=+1; L=+1)$, o que corresponde aos seus valores máximos; ocorre ainda nessa região um patamar, em que o efeito de N e de L se torna mais reduzido. No caso do eucalipto o efeito principal é o da carga L, tendo um sinal positivo; o efeito de interação é também da mesma ordem de grandeza, afectando sobretudo a acção de N. Resulta assim para o eucalipto a existência de um máximo local em $(L=+1; N=-1)$, ocorrendo o respectivo mínimo em $(L=-1; N=-1)$. No caso da bétula o efeito dominante também é o da carga L, que tal como o eucalipto tem o sinal positivo; no entanto aqui o efeito da interação é comparativamente mais reduzido. Resulta assim na bétula a ocorrência de um mínimo para $(L=-1; N=-1)$, da mesma forma que para o eucalipto. Curiosamente, o máximo encontrado situa-se ao longo da linha para $L=+1$; assim, o efeito de N vai-se reduzindo à medida que a carga L aumenta, tornando-se nulo quando L atinge o seu valor máximo. É interessante verificar, para os casos do pinho e da bétula, a similitude dos efeitos de N e de L no teor de finos comparativamente ao efeito daquelas variáveis no seu grau refinação SR e no tempo de drenagem DT. Vejam-se os Gráficos 5-15 e os Gráficos 5-2.



Gráficos 5-15 Taxa de Finos P200 do Bauer-McNett (%) no nível de energia E_3 .

5.8. *Análise global e conclusões sobre as propriedades das pastas*

Neste capítulo acompanhou-se a evolução das propriedades das pastas em função das condições operatórias e da energia específica de refinação. Podem-se extrair as seguintes conclusões básicas sobre o comportamento das propriedades das pastas:

1. É possível estabelecerem-se equações globais para cada matéria-prima, relacionando cada propriedade da pasta com a energia específica de refinação e com as propriedades operacionais do refinador Valley, nomeadamente a velocidade de rotação do rotor e a carga aplicada. Para cada matéria-prima obtiveram-se relações para o grau de refinação SR, a drenabilidade DT, o grau de hidratação WRV, o comprimento aritmético da fibra L_a , o *wet zero-span tensile* como uma forma de avaliar a resistência da fibra, a flexibilidade da fibra em estado húmido, o seu teor em macrofibrilas e a taxa de finos.
2. Pode-se fazer um estudo comparativo do comportamento das diferentes pastas através da análise dos gráficos de evolução das propriedades no ponto central O ($N=0$; $L=0$) com a energia específica de refinação, que estabelece um comportamento médio das pastas para cada propriedade.
3. Pode-se também fazer um estudo para cada pasta do efeito das condições de operação do refinador, i.e. a velocidade de rotação do rotor e a carga aplicada, sobre a evolução das propriedades acima referidas em cada nível de energia. É interessante observar as diferentes evoluções das propriedades da pasta como função das variáveis processuais N e L nas diferentes matérias-primas, designadamente pinho, eucalipto e bétula.
4. O $WRV_{intrafibras}$ aumenta de uma forma praticamente linear ao longo da refinação, o grau de refinação SR evidencia uma tendência para a evolução exponencial e no tempo de drenagem esta tendência acentua-se drasticamente, particularmente para os níveis energéticos mais elevados. Estes resultados experimentais são globalmente consistentes com a ideia aceite que nas fases iniciais da refinação predomina a

hidratação da fibra, e só depois ganha relevância a produção de finos, decorrente, no essencial, das fibrilas.

5. O corte das fibras é reduzido e a flexibilidade evolui conforme o esperado.
6. O pinho apresenta os maiores valores para o WRV (Gráfico 5-5, p.106), o *zero-span* (Gráfico 5-9, p.112), a flexibilidade (Gráfico 5-10, 113), o comprimento aritmético da fibra (Gráfico 5-7, p.109) e o teor em macrofibrilas (Gráfico 5-12, p.116); este último factor reduz-se para energias de refinação elevadas provavelmente pela libertação das macrofibrilas. Apresenta ainda o menor teor mássico em finos (Gráfico 5-14, p.120), possivelmente pela menor proporção do material perdido em finos em relação à massa total.
7. O eucalipto apresenta por sua vez o maior teor em finos e os menores valores para o WRV, o comprimento aritmético das fibras e o teor em macrofibrilas.
8. A bétula apresenta os menores valores para o *zero-span* e para a flexibilidade, nesta última acima do nível da energia específica de refinação E_2 . Exibe ainda valores para o WRV próximos dos apresentados pelo eucalipto.
9. A evolução do grau de refinação SR com a energia específica de refinação (Gráfico 5-1, p.99) é análoga para as três pastas, no entanto apresentam diferentes pontos de inflexão. Não obstante, possuem tempos de refinação bastante diferentes, como se pode observar nas curvas de refinação padrão (veja-se o Gráfico 3-1, o Gráfico 3-2 e o Gráfico 3-3, p.53). Por sua vez em relação ao tempo de drenagem (Gráfico 5-3, p.102) os pontos de inflexão estão próximos entre si.
10. No caso do pinho, os efeitos da velocidade de rotação N e da carga L são análogos para o grau de refinação SR (Gráficos 5-2, p.101), o tempo de drenagem DT (Gráficos 5-4, p.104) e o teor de finos (Gráficos 5-15, p.121), sendo ainda equivalente mas de sinal contrário para o comprimento aritmético das fibras L_a (Gráficos 5-8, p.110). Em relação às propriedades hidromecânicas no entreferro, os efeitos de N e

de L são análogos mas de sinal contrário para o SEL (Gráfico 3-5, p.69), a tensão tangencial (Gráficos 4-2, p.76), o coeficiente de fricção (Gráficos 4-3, p.78) e a taxa de evolução do entreferro (Gráficos 4-6, p.81). Estas conclusões são estabelecidas por comparação directa dos respectivos gráficos tridimensionais. O teor de macrofibrilas (Gráficos 5-13, p.118) e WRV (Gráficos 5-6, p.107) parecem ser essencialmente uma função de N, tendo os respectivos gráficos forma análoga à do gradiente de velocidade no entreferro. O índice de flexibilidade (Gráficos 5-11, p.115) apresenta uma forma parabolóide hiperbólica.

11. O eucalipto estudado apresenta-se como uma pasta de mais difícil análise, pela sua menor sensibilidade a N e L. Na exposição que se segue para o eucalipto e para a bétula, os gráficos analisados têm a mesma referência das propriedades já mencionadas no caso do pinho no ponto 10. Para o eucalipto, a análise comparativa entre gráficos permite estabelecer analogias entre a evolução do tempo de drenagem DT e o WRV. O teor de finos, por sua vez, possui uma forma análoga ao gradiente de velocidade G (Gráficos 4-8, p.84) e à tensão tangencial τ_t , possuindo também uma forma equivalente mas simétrica ao do coeficiente de fricção f e ao valor do entreferro inicial e (Gráficos 4-5, p.80).
12. Para a bétula podem-se estabelecer dois grupos de analogias. O primeiro possui efeitos significativos de N e L, e inclui o tempo de drenagem DT, o teor de finos, o teor em macrofibrilas e ainda o gradiente de velocidade; este último factor poderá ser determinante nas restantes variáveis aí incluídas. O segundo grupo é essencialmente dependente de N, e inclui o grau de refinação SR e o WRV, podendo-se equiparar aos gráficos com efeitos simétricos do comprimento aritmético das fibras L_a , o coeficiente de fricção f , o valor do entreferro e e a taxa de evolução do entreferro.
13. De uma forma geral, a bétula responde de forma oposta ao pinho e ao eucalipto relativamente à variação da velocidade N. Tal facto é sustentado pelos valores obtidos por Levlin (1975).

14. Constata-se que os efeitos da velocidade de rotação N sobre a hidratação das fibras ($WRV_{\text{Intrafibra}}$) são inversos aos ocorridos em relação ao comprimento da fibra. Este facto dificulta a tarefa do papelheiro de optimização simultânea da resistência à tracção e ao rasgamento.

6. Análise das Propriedades do Papel

6.1. Massa volúmica

A refinação gera nas fibras os efeitos de fibrilação interna, fibrilação externa, hidratação, corte e produção de finos; tais modificações estruturais fazem com que a área e o volume específicos e conformabilidade da fibra em estado húmido aumentem. De maneira inversa, isto provoca ao nível macroscópico um efeito de densificação da estrutura do papel durante a secagem da folha. A massa volúmica é uma variável importante porque influencia muitas outras propriedades do papel, tais como a resistência à tracção, o módulo de elasticidade, a rigidez e o coeficiente de dispersão da luz. Para além da massa volúmica, estas propriedades são também função da forma como ela foi atingida, tais como a composição fibrosa, o nível de refinação, as condições de prensagem em húmido e de calandragem (Kajanto, Laamanen e Kainulanen, 1998, p.89). Há autores que inclusivamente defendem que o volume específico (o inverso da massa volúmica) e não a resistência seja a base para a comparação entre pastas de papel. Clark (1985, p.568-575) refere que o volume específico decresce de maneira praticamente linear com o logaritmo do tempo de refinação. Este autor refere ainda a existência de relações lineares entre o volume específico e algumas propriedades do papel, tais como a resistência à tracção e ao reventamento; algumas outras propriedades, como o rasgamento e a rigidez, apresentam uma relação linear em porções da curva.

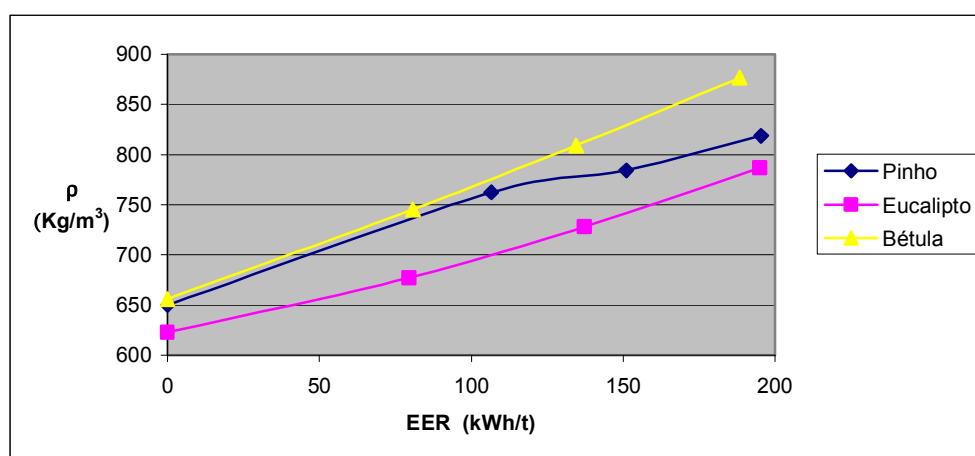


Gráfico 6-1 Massa volúmica do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.

As equações obtidas para a evolução da massa volúmica (kg/m^3) em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$MV_p = (4,62 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,78 \times 10^{-1} \cdot E) \times N + (-3,00 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 1,17 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (4,67 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (-1,79 \times 10^{-3} \cdot E^2 + 1,20 \cdot E + 651)$$

Equação 6-1

$$MV_E = (5,34 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 9,43 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (-2,58 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 5,33 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (-4,93 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 9,08 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (1,35 \times 10^{-3} \cdot E^2 + 5,78 \times 10^{-1} \cdot E + 623)$$

Equação 6-2

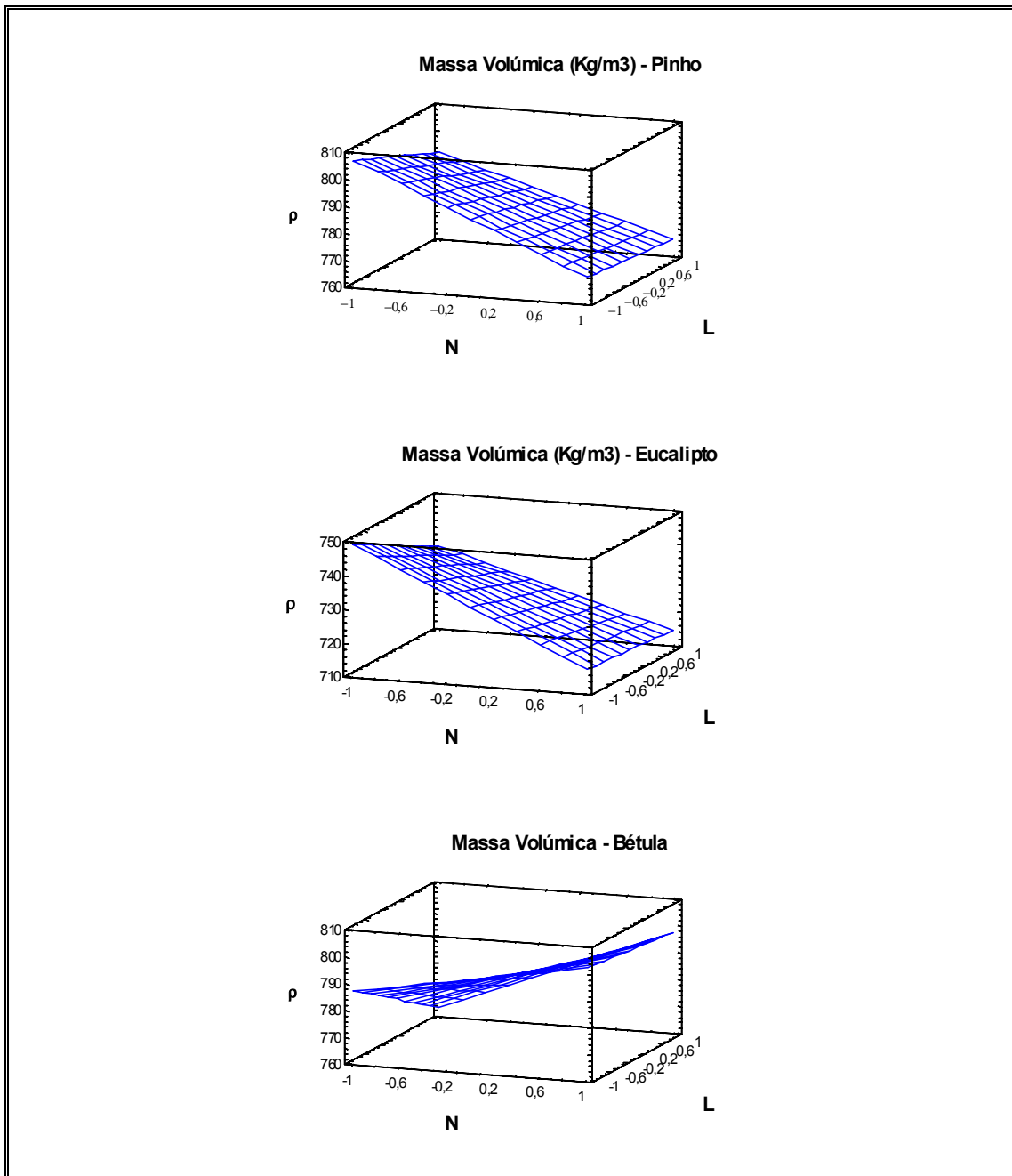
$$MV_B = (-3,64 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 1,51 \times 10^{-1} \cdot E) \times N + (-4,15 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 3,81 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (9,51 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (0,949 \cdot E + 658)$$

Equação 6-3

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

No Gráfico 6-1 representa-se a massa volúmica do papel em função da energia específica de refinação no ponto central para as três matérias-primas. A bétula e o eucalipto apresentam evoluções lineares da massa volúmica, representando a bétula os valores máximos e o eucalipto os valores mínimos na análise comparativa. O pinho por sua vez apresenta valores intermédios, tendo até o nível E_1 uma taxa de evolução mais elevada, reduzindo esse progresso após aquele ponto.

Os Gráficos 6-2 contêm a representação da massa volúmica em função de N e de L no nível de energia E_2 , para as três matérias-primas. No caso do pinho o efeito dominante é a velocidade de rotação N , que está dotada de um coeficiente de sinal negativo; desta forma, aumentos de rotação causam diminuição da massa volúmica. O efeito da carga L está também provido de um sinal negativo, pelo que aumentos em L causam redução na massa volúmica do papel. O eucalipto também tem como efeito dominante a velocidade de rotação N ; os coeficientes em N e em L são igualmente negativos. Assim, aumentos na velocidade de rotação originam uma redução da massa volúmica, sendo o efeito da carga L análogo mas com menor valor. A bétula também tem como efeito dominante a velocidade de rotação N , dotada agora de coeficiente positivo. O coeficiente em L é negativo acima de E_2 ; contudo, o coeficiente de



Gráficos 6-2 Massa Volúmica (kg/m³) no nível de energia E_2 .

interacção é bastante elevado, o que conduz à existência de um máximo para ($N=+1$; $L=-1$) e de um mínimo para ($N=-1$; $L=+1$). Analisando-se os gráficos de uma forma global, verifica-se que estes correlacionam perfeitamente com a área relativa da ligação RBA, o que é normal (observem-se os Gráficos 6-18, p.153); quanto maior a área relativa de ligação, maior a interligação entre as fibras e maior a compactação da folha, expressa numa maior massa volúmica. Esta densificação da folha de papel é influenciada pela capacidade de hidratação das fibras, expresso pelo WRV (vejam-se

os Gráficos 5-6, p.107); assim, quanto maior é o valor do WRV maior é a plasticidade da fibra e logo maior é o RBA, sendo menor o coeficiente de dispersão da luz (vejam-se os Gráficos 6-14, p.147) e menor a opacidade da folha (Gráficos 6-12, p.143).

6.2. Resistência à tracção.

A resistência à tracção é uma propriedade muito útil para análise da resistência geral de um determinado material. Para o papel, esta corresponde à máxima força por unidade de largura do papel que este consegue resistir quando se aplica a força na direcção da tira. No teste de tensão, uma tira de papel com dimensões padrão é distendida até que a ruptura ocorra. A resistência à tracção é medida em N/m. O índice de tracção IT (Nm/g) é então calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Índice de Tracção} = \text{Resistência à Tracção (Nm}^{-1}\text{)} / \text{Gramagem (gm}^{-2}\text{)}$$

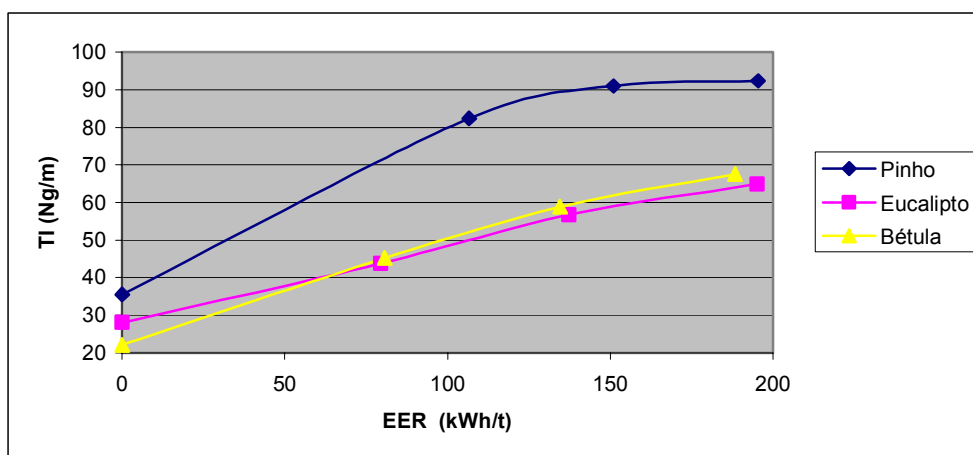


Gráfico 6-3 Índice de tracção do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.

As fórmulas obtidas para o índice de tracção de cada uma das matérias-primas em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$IT_p = (5,04 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,02 \times 10^{-1} \cdot E) \times N + (4,12 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 7,14 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (-2,02 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 3,58 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (-1,69 \times 10^{-3} \cdot E^2 + 6,21 \times 10^{-1} \cdot E + 35,4)$$

Equação 6-4

$$IT_E = (1,09 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 1,78 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (-1,12 \times 10^{-2} \cdot E) \times L \\ + (-9,58 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 2,24 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (-1,81 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 2,28 \times 10^{-1} \cdot E + 27,8)$$

Equação 6-5

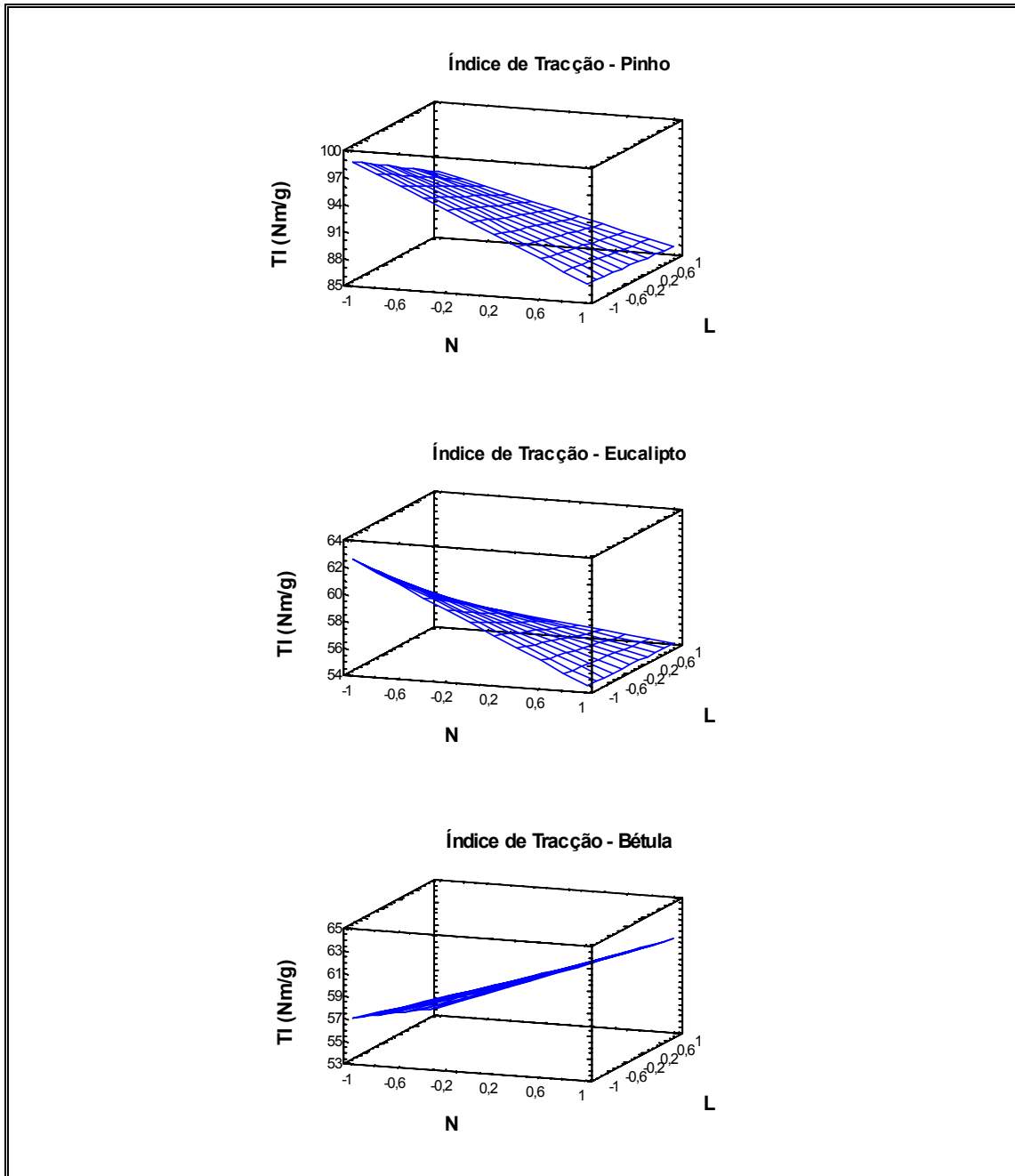
$$IT_B = (-2,56 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 5,99 \times 10^{-2} \cdot E) \times N + (7,59 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 2,04 \times 10^{-2} \cdot E) \times L \\ + (3,79 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 6,34 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-4,74 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 3,32 \times 10^{-1} \cdot E + 22,1)$$

Equação 6-6

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

No Gráfico 6-3 pode apreciar-se a evolução do índice de tracção do papel com a energia específica de refinação utilizando as condições do ponto central. O pinho apresenta o índice de tracção mais elevado, atingindo um patamar após o nível E_2 da energia específica de refinação (cerca de 150kWh/t). Os valores do índice de tracção para o eucalipto e a bétula são por sua vez semelhantes, sendo a taxa de evolução dessa propriedade mais elevada para a bétula. Assim sendo, o valor inicial mais baixo do índice de tracção para a bétula ultrapassa o valor desse índice para o eucalipto. Além da superioridade da pasta de pinho, é manifesto o bom desempenho do eucalipto se se tiver em conta a muito baixa massa volúmica (Gráfico 6-1, p.127). Este resultado ocorre apesar das fibras da bétula serem mais longas e o papel exibir maior RBA (Gráfico 6-17, p.151). A bétula exibe uma muito baixa resistência à tracção face ao pinho, tendo em conta que têm massas volúmicas similares.

Os Gráficos 6-4 representam o índice de tracção das diferentes pastas no nível de energia E_2 em relação a N e a L. O efeito mais importante para o pinho até ao nível de energia E_2 é a velocidade de rotação N, que está dotada de um coeficiente negativo; assim, aumentos na velocidade de rotação levam a uma redução no índice de tracção. O coeficiente da carga L tem um valor mais reduzido (cerca de metade), possuindo também sinal negativo. No nível de energia E_3 ocorre uma redução do índice de tracção no ponto com (N=-1;L=-1) em relação aos níveis de energia anteriores. Desta forma este ponto, que representava o valor máximo do índice de tracção, no nível E_3 passa a ter o valor mínimo. No nível E_3 o efeito dominante passa a ser a carga L, com um sinal positivo; aumentos na carga resultam aqui em aumentos no índice de tracção. O eucalipto possui coeficientes em N e em L negativos, estando dotado no entanto de



Gráficos 6-4 Índice de Tracção (N.m/g) no nível de energia E_2 .

um coeficiente de interação elevado. Esta combinação dos factores conduz à existência de um máximo para $(N=-1;L=-1)$, e um mínimo para $(N=+1;L=+1)$. A bétula também tem como efeito dominante a velocidade de rotação N ; neste caso o coeficiente tem um sinal positivo, pelo que aumentos na velocidade de rotação N levam a aumentos no índice de tracção. O coeficiente em L tem por sua vez sinal negativo, resultando que os aumentos em L leva a uma redução do índice de tracção. O efeito global destes factores é a existência de um máximo em $(N=+1;L=-1)$ e de um

mínimo em (N=-1;L=+1). Finalmente, ao analisar globalmente os efeitos de N e L, observa-se a existência de uma correlação entre a resistência à tracção e a massa volúmica do papel (comparem-se os Gráficos 6-2, na p.129, com os Gráficos 6-4). Verifica-se igualmente uma correlação entre a resistência à tracção e o grau de refinação SR (Gráficos 5-2, p.101), o tempo de drenagem DT (Gráficos 5-4, p.37) e o WRV (Gráficos 5-6, p.107).

6.3. Índice de reventamento

A resistência ao reventamento é dada pela máxima pressão que o papel pode suportar sem se romper, sendo essa pressão aplicada perpendicularmente ao plano da folha a ser testada. A sua unidade é kPa. O índice de reventamento BI (kPa.m²/g), utilizado para a análise comparativa do papel, é dado pela fórmula:

$$\text{Índice de Reventamento} = \text{Resistência ao Reventamento (kPa)} / \text{Gramagem (gm}^{-2}\text{)}$$

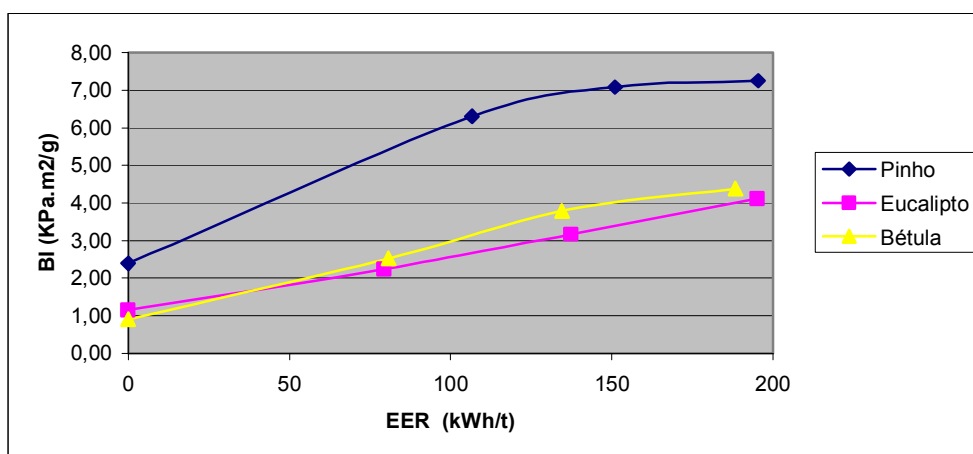


Gráfico 6-5 Índice de reventamento do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.

As fórmulas obtidas para o índice de reventamento de cada uma das matérias-primas em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$BI_p = (1,23 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 2,99 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (1,34 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 3,35 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (1,90 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 2,19 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-1,35 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 5,13 \times 10^{-2} \cdot E + 2,39)$$

Equação 6-7

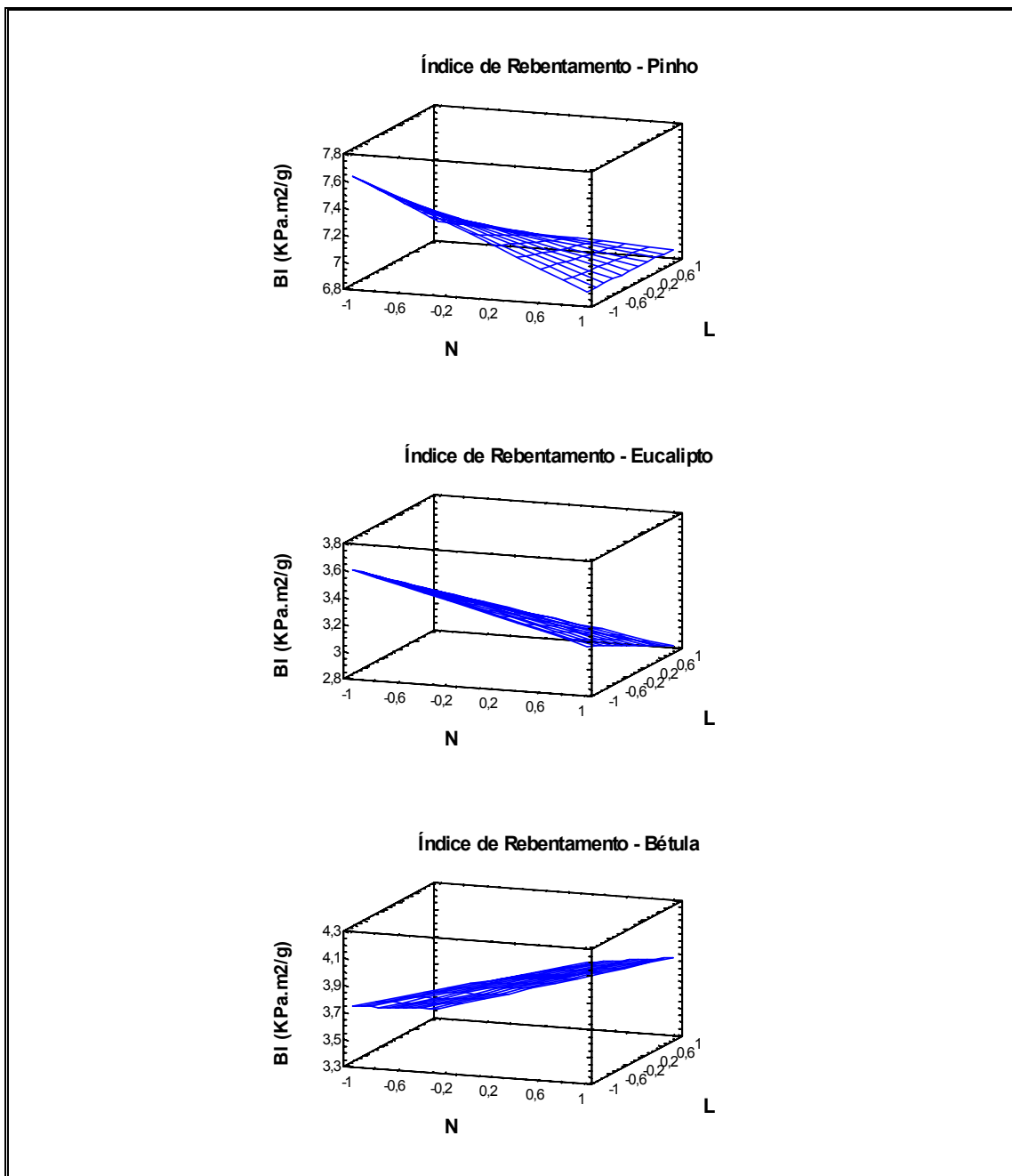
$$BI_E = (-9,34 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 9,30 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (9,33 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 2,51 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (-8,14 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,53 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (1,14 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 1,30 \times 10^{-2} \cdot E + 1,15)$$

Equação 6-8

$$BI_B = (-2,51 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 5,41 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (7,34 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 2,00 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (1,21 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 1,83 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-2,86 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 2,43 \times 10^{-2} \cdot E + 0,88)$$

Equação 6-9

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.



Gráficos 6-6 Índice de Rebentamento (kPa.m²/g) no nível de energia E₂.

O Gráfico 6-5 representa o índice de rebentamento para as diferentes matérias-primas em função da energia específica de refinação no ponto central. Pode-se constatar que a evolução do índice de rebentamento para pasta é similar à do respectivo índice de tracção. Desta forma, conclusões análogas podem ser retiradas da análise desta variável.

Os Gráficos 6-6 apresentam o índice de rebentamento das diferentes pastas em função de N e de L no nível de energia E_2 . O pinho apresenta coeficientes em N e em L negativos e com a mesma ordem de grandeza; no entanto o efeito de interacção é crescente. Esta conjugação de factores conduz à existência de um máximo em (N=-1; L=-1); para o nível de energia E_3 surge um máximo local em (N=+1; L=+1), ocorrendo uma concavidade abarcando uma linha de mínimos locais próxima da linha de ligação entre (N=+1; L=-1) e (N=-1; L=+1). O eucalipto apresenta coeficientes em N e em L negativos e com a mesma ordem de grandeza. Resulta do facto a existência de um máximo em (N=-1;L=-1) e um mínimo em (N=+1;L=+1). A bétula tem inicialmente como factor dominante N, com um coeficiente positivo que decresce com a refinação; resulta assim um aumento do índice de rebentamento com o aumento de N, se bem que aquele decresça com o aumento do nível energético. L é dotado com um coeficiente negativo, sendo o efeito do seu aumento uma redução do índice de rebentamento. A conjugação destes factores leva à existência de um máximo em (N=+1;L=-1), e de um mínimo em (N=-1;L=+1).

Analisando globalmente, o comportamento da resistência ao rebentamento é similar à da resistência à tracção para as folhas secas em laboratório secas sem contracção. Este era um comportamento previsível e estende-se para todas as condições de refinação.

6.4. Índice de rasgamento

A resistência ao rasgamento é dada pela força média requerida para prosseguir o rasgamento do papel a partir de um corte inicial que lhe foi aplicado. A sua unidade é mN. O índice de rasgamento IR ($N.m^2/kg$) é dado pela fórmula:

$$\text{Índice de Rasgamento} = \text{Resistência ao Rasgamento} / \text{Gramagem}$$

As fórmulas obtidas para o índice de rasgamento de cada uma das matérias-primas em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$IR_p = (2,29 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 1,17 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-7,08 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,87 \times 10^{-3} \cdot E) \times L \\ + (2,81 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 7,17 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (5,15 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 4,31 \times 10^{-2} \cdot E + 16,2)$$

Equação 6-10

$$IR_E = (-1,05 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 1,69 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (5,22 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 9,87 \times 10^{-3} \cdot E) \times L \\ + (1,94 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 3,55 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-7,75 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 3,06 \times 10^{-2} \cdot E + 4,43)$$

Equação 6-11

$$IR_B = (-1,09 \times 10^{-8} \cdot E^2 - 3,29 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (-1,13 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 2,13 \times 10^{-3} \cdot E) \times L \\ + (8,06 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 1,76 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-1,03 \times 10^{-4} \cdot E^2 + 2,58 \times 10^{-2} \cdot E + 6,52)$$

Equação 6-12

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

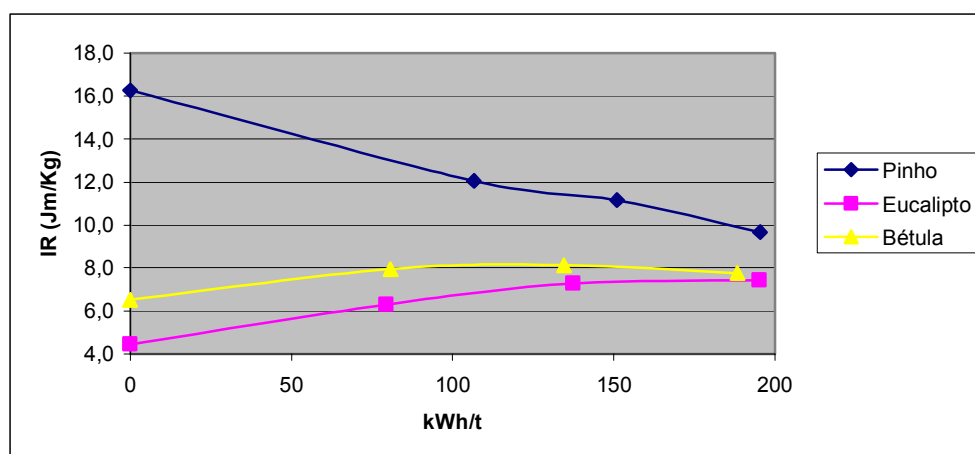
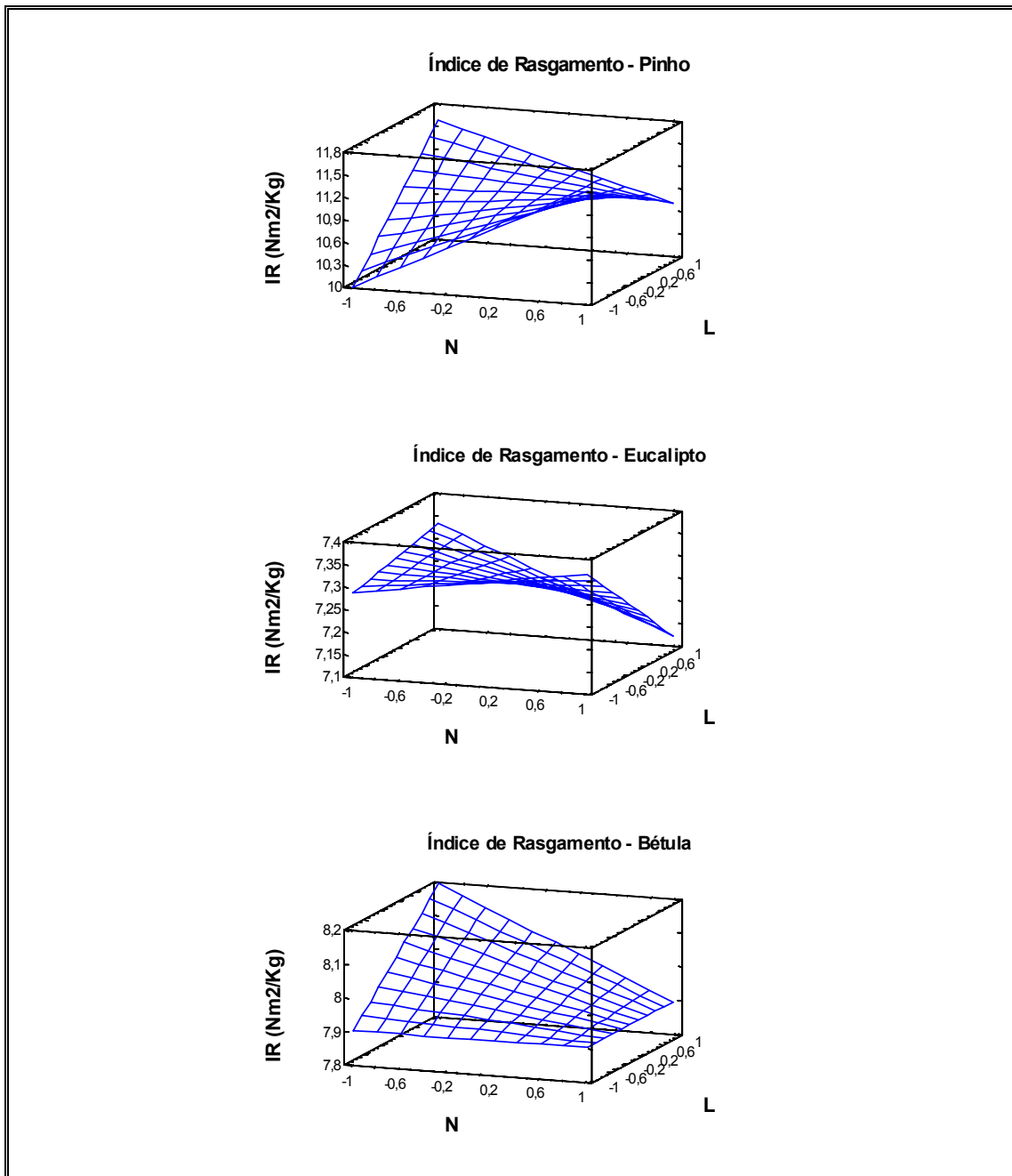


Gráfico 6-7 Índice de rasgamento do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.

O Gráfico 6-7 ilustra a evolução do índice de rasgamento de cada pasta em função da energia específica de refinação no ponto central. Os resultados estão de acordo com o esperado para fibras curtas e longas. Os maiores valores ocorrem naturalmente para a fibra longa de pinho. No entanto, o ligeiro aumento que é usual registar no início da refinação para este tipo de fibra está ausente, provavelmente porque não se analisou o nível de energia intermédio entre 0 e 100kWh/t. O índice de rasgamento da bétula por sua vez cresce e atinge um patamar após E_1 (cerca de



Gráficos 6-8 Índice de Rasgamento ($\text{N.m}^2/\text{Kg}$) no nível de energia E_2 .

80kWh/t) e parece começar a diminuir em E_3 (cerca de 188kWh/t). O eucalipto apresenta inicialmente um valor inferior à bétula, mas aproxima-se gradualmente a uma taxa constante até atingir um patamar após E_2 (aproximadamente 134kWh/t).

Os Gráficos 6-8 expressam o índice de rasgamento de cada matéria-prima em função de N e de L no nível de energia E_2 . O pinho possui coeficientes positivos para N e para L, tendo no entanto um coeficiente negativo para o factor de interacção. Esta conjugação de efeitos resulta num máximo para $(N=-1;L=+1)$ e um mínimo para

($N=-1; L=-1$). Os efeitos de L e de interação sofrem um crescimento inicial e depois diminuem, no entanto não alterando os pontos máximos e mínimos. Para o eucalipto apura-se um efeito de crescimento inicial de todos os efeitos, seguindo-se uma redução; assim no nível E_1 verifica-se um efeito positivo de N , sendo os efeitos de L e de interação negativos. O efeito global leva à existência do mesmo mínimo em todos os níveis de energia, o ponto ($N=+1; L=+1$); os pontos ($N=+1; L=-1$), ($N=-1; L=+1$) e ($N=-1; L=-1$) constituem um patamar superior de valores, em que inicialmente o máximo absoluto ocorre em ($N=+1; L=-1$), no último nível o máximo transfere-se para ($N=-1; L=-1$). A bétula possui um coeficiente em N negativo e de módulo crescente; o coeficiente em L é positivo e passa por um máximo; o coeficiente de interação é negativo, passando por um mínimo. Tal conjugação de efeitos resulta no mesmo máximo nos três níveis de energia, que ocorre em ($N=-1; L=+1$); nos pontos ($N=+1; L=-1$), ($N=+1; L=+1$) e ($N=+1; L=-1$) existe um patamar inferior, em que o valor mínimo ocorre no seio destes valores. Esta propriedade depende em primeiro lugar do comprimento da fibra e depois do grau de ligação entre as fibras e da retracção das fibras durante a secagem (que aqui não ocorre). Verificam-se assim evoluções ao longo da refinação com efeitos opostos sobre o rasgamento: o comprimento da fibra diminui e a área de ligação aumenta. Torna-se desta forma difícil de correlacionar os efeitos por simples comparação de gráficos, sendo necessário um tratamento de dados mais aprofundado para analisar estes efeitos. Um exemplo desta conjugação de efeitos opostos é o pinho, aonde a evolução do índice de rasgamento em relação ao índice de tracção mostra uma correlação inversa, o que torna difícil a optimização conjunta destas propriedades do papel. Compare-se o Gráfico 6-3 (p.130) com o Gráfico 6-7 (p.136).

6.5. Brancura e Opacidade

Brancura

A brancura ISO é a reflectância³⁵ de uma camada de folhas do papel em análise à luz azul, que tem um comprimento de onda efectivo de 457nm. Esta camada deve conter um número de folhas suficiente para que a adição de novas folhas não altere o valor de leitura. Os valores obtidos seguem a norma ISO 2469, na qual ocorre

uma iluminação difusa por reflexão numa geometria esférica e uma observação a 0°. A brancura ISO ou reflectância R_{457} , como por vezes é chamada, trata-se de uma medida do efeito do branqueamento da pasta; isso porque o efeito do branqueamento é sobretudo aumentar a reflectância na zona azul do espectro. A escolha do azul vem da percepção do olho que julga a brancura como uma diminuição da cor amarela.

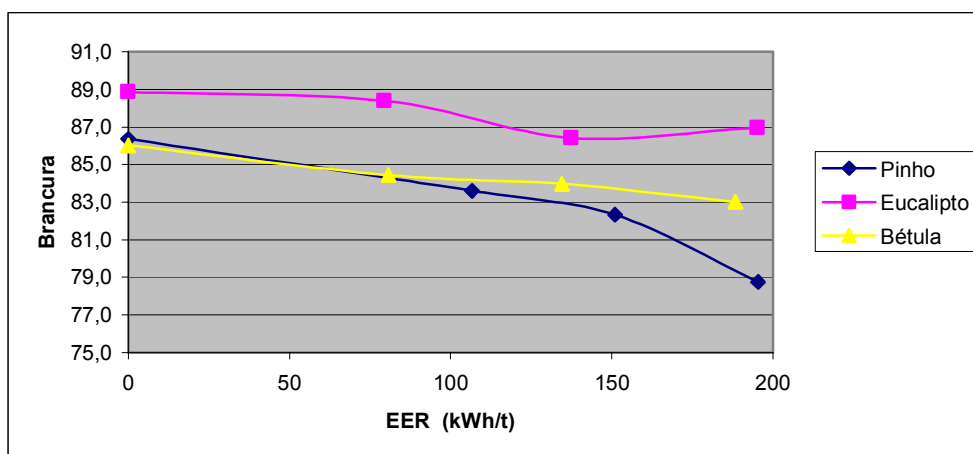


Gráfico 6-9 Brancura do papel (%) em função da energia específica de refinação no ponto central.

As fórmulas obtidas para a brancura de cada uma das matérias-primas em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$BR_p = (1,29 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 8,59 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-4,81 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 1,08 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (7,65 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 5,71 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-1,79 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 2,56 \times 10^{-3} \cdot E + 86,3)$$

Equação 6-13

$$BR_e = (-4,54 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 7,29 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-2,57 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 4,11 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (2,07 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 3,52 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-1,19 \times 10^{-2} \cdot E + 88,9)$$

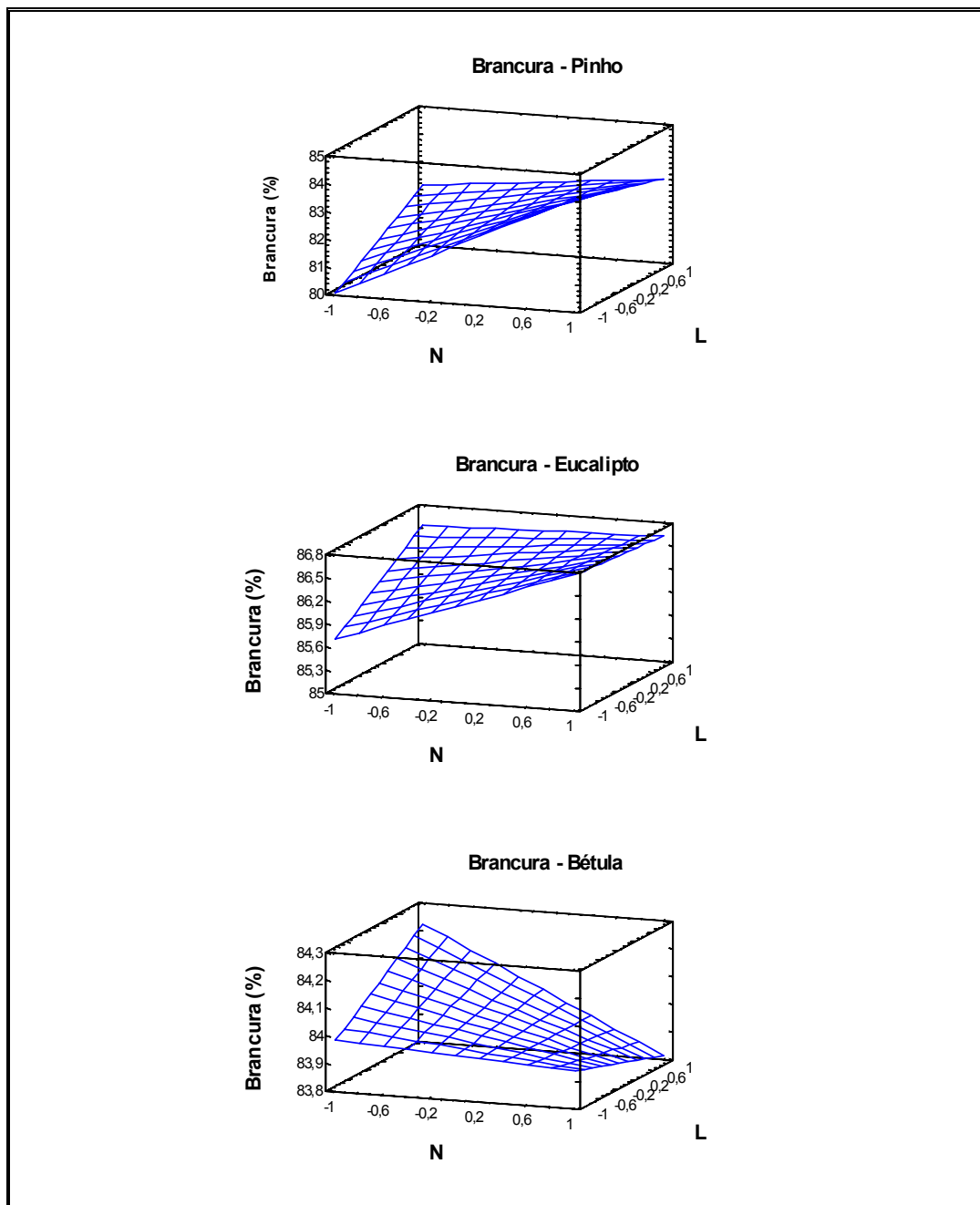
Equação 6-14

$$BR_b = (-1,30 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 1,35 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (5,98 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,38 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (-1,03 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 1,76 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-1,54 \times 10^{-2} \cdot E + 85,9)$$

Equação 6-15

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

³⁵ Reflectância é a razão entre o fluxo radiante reflectido por uma superfície e o fluxo que nela incide.



Gráficos 6-10 Brancura (%) no nível de energia E_2 .

O Gráfico 6-9 mostra a brancura do papel em função da energia específica de refinação no ponto central para as diferentes matérias-primas. Presencia-se aqui que se obtêm as maiores brancuras para o eucalipto. A brancura do pinho e da bétula são inicialmente semelhantes, mas a do primeiro reduz-se com maior celeridade. A diminuição da brancura com a refinação é expectável e atribuível à diminuição do coeficiente de dispersão da luz (Gráfico 6-13, p.146). As diferenças entre matérias-

primas decorrem dos coeficientes de dispersão e absorção (Gráfico 6-15, p.148) da luz.

Os Gráficos 6-10 expõem a brancura no nível de energia E_2 para as diferentes pastas em função de N e L. Para o pinho o efeito principal é o da velocidade de rotação N, cujo coeficiente tem um valor positivo crescente; resulta daqui que a brancura aumenta com a velocidade de rotação. O coeficiente de L é também positivo, mas o seu efeito está encoberto pelo valor da interação. Dessa conjugação de efeitos resulta a existência de um valor mínimo em (N=-1; L=-1), sendo o valor máximo atingido em (N=+1; L=-1). O eucalipto possui por sua vez coeficientes em N e em L positivos, que para o nível de energia E_3 se tornaram negativos. Assim, este comportamento nos níveis de energia E_1 e E_2 levou à existência de um máximo em (N=+1; L=-1) e um mínimo em (N=-1; L=-1); no último nível de energia o mínimo encontra-se agora no ponto (N=+1; L=+1). Para a bétula o efeito predominante é o da velocidade de rotação N, que possui um coeficiente negativo; resulta daí que aumentos na velocidade de rotação provocam uma redução na brancura. O efeito de L é positivo, mas o seu efeito é encoberto pelo efeito de interação. O resultado mais visível desta conjugação de efeitos é a ocorrência de um máximo para (N=-1; L=+1) e de um mínimo para (N=+1; L=-1). Em síntese, é claro o efeito do coeficiente de dispersão da luz, que aumenta quando a massa volúmica (Gráfico 6-1, p.127) é menor; este efeito aumenta a brancura, sobretudo quando o coeficiente de absorção diminui.

Opacidade

A opacidade é uma medida da capacidade de um material obstruir a passagem da luz. Um determinado nível de opacidade é importante para evitar que um texto escrito numa face seja visto na página reversa. A opacidade (%) pode ser medida de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Opacidade (\%)} = (R_0 / R_\infty) \times 100$$

em que R_0 é a reflectância de uma folha de papel medida contra um fundo negro³⁶, e R_∞ é a reflectância máxima oferecida por uma camada de folhas do papel

³⁶ Um fundo negro é por definição aquele que absorve uma grande percentagem da luz em todas as frequências da luz visível.

em análise, num número em que folhas suplementares não alterem o valor de leitura. A norma utilizada foi a ISO 2471, que utiliza o iluminante C em combinação com um filtro verde padrão Y correspondente à sensibilidade do olho humano e uma geometria $d/0^{37}$.

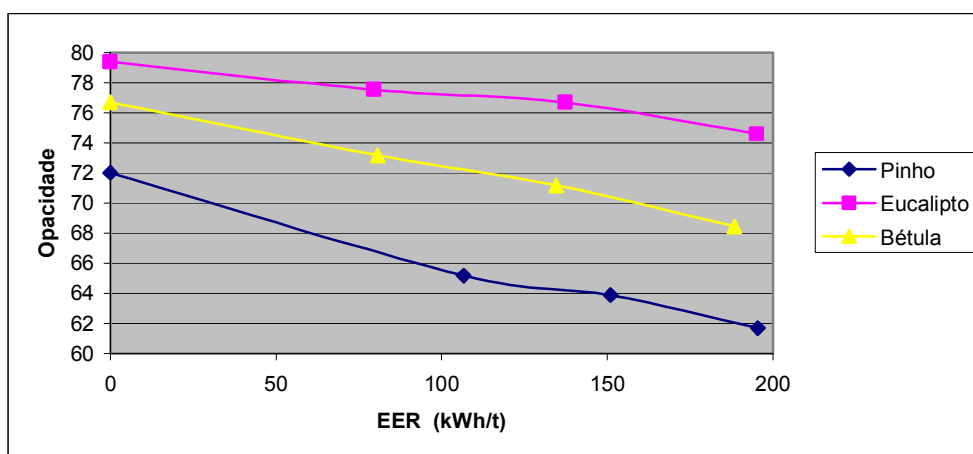


Gráfico 6-11 Opacidade do papel em função da energia específica de refinação no ponto central.

As fórmulas obtidas para a opacidade de cada uma das matérias-primas em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$OP_p = (2,35 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 2,16 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-2,95 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 6,63 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (5,84 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 1,52 \times 10^{-2} \cdot E) \times N \times L + (1,03 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 7,20 \times 10^{-2} \cdot E + 72,0)$$

Equação 6-16

$$OP_e = (5,40 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 2,57 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-1,98 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 5,65 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (-3,87 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 1,61 \times 10^{-2} \cdot E + 79,3)$$

Equação 6-17

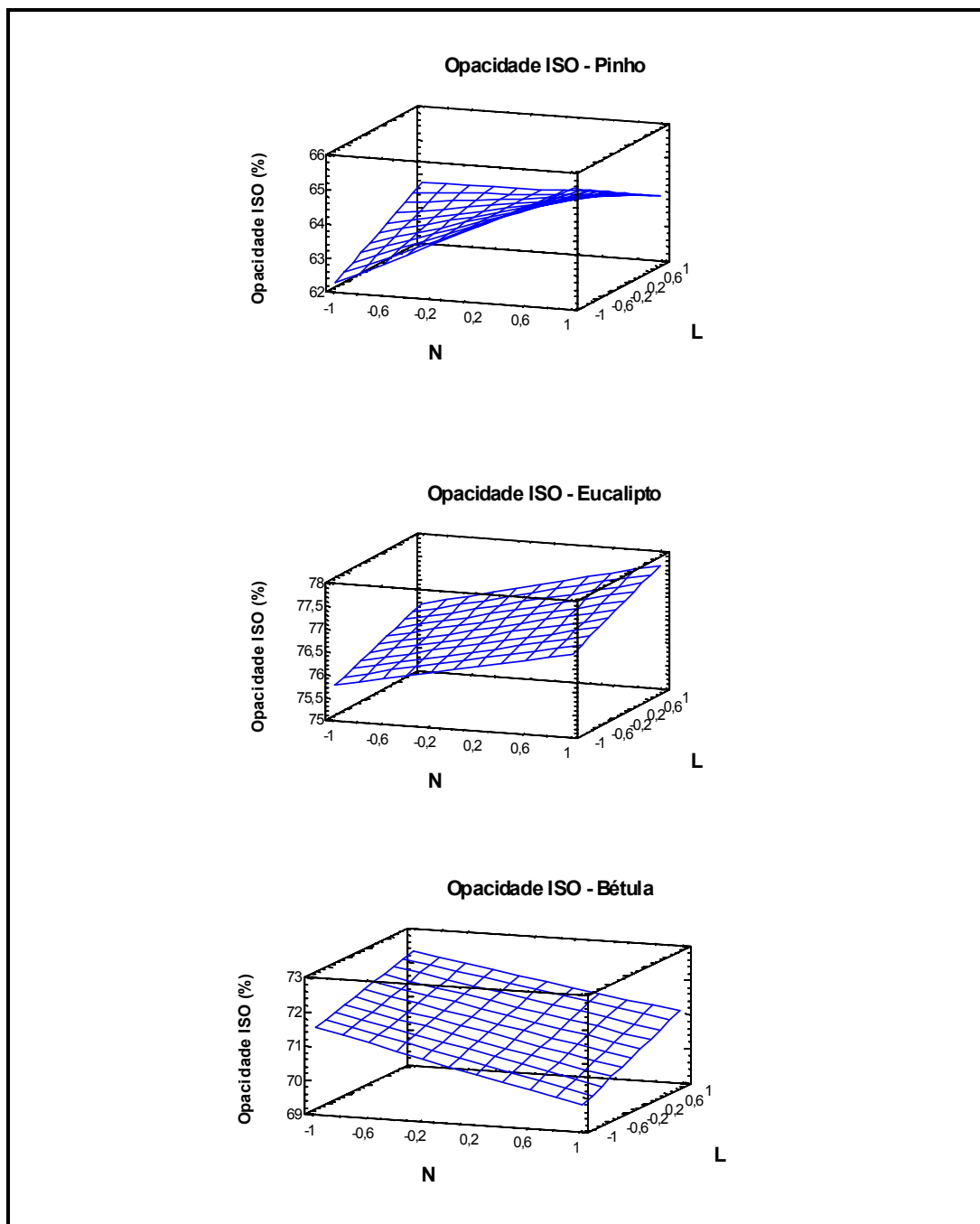
$$OP_b = (-5,37 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 4,96 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-2,81 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 5,95 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (1,74 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 1,05 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-4,29 \times 10^{-2} \cdot E + 76,7)$$

Equação 6-18

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

³⁷ Trata-se de condições padrão definidas pelo CIE (Commission Internationale de l'Eclairage); C é um iluminante padrão com comprimento de onda efectivo de 557nm e d refere-se à geometria esférica de iluminação difusa e 0° ao ângulo de observação.

O Gráfico 6-11 contém a opacidade do papel em função da energia específica de refinação no ponto central para as diferentes pastas. Atesta-se que a opacidade desce regularmente em todas as matérias-primas, apresentando o eucalipto o maior valor e a pinho o menor. A superioridade do eucalipto face à bétula é notória e decorre da menor densidade das folhas de eucalipto, e em última análise das características das fibras de eucalipto nacional.



Gráficos 6-12 Opacidade ISO (%) no nível de energia E_2 .

O Gráficos 6-12 mostra a opacidade ISO no nível de energia E_2 para as diferentes matérias-primas. O pinho apresenta como factor preponderante a velocidade de rotação N , que possui um coeficiente positivo e crescente. O efeito L está provido de um coeficiente positivo, mas cujo valor se torna secundário perante o efeito de interação. Esta conjugação de efeitos resulta na existência de um máximo para $(N=+1; L=-1)$, e de um mínimo em $(N=-1; L=-1)$. O eucalipto possui coeficientes positivos em N e em L ; o efeito global resultante é a existência de um máximo em $(N=+1; L=+1)$ e um mínimo em $(N=-1; L=-1)$. A bétula possui como efeito dominante a velocidade de rotação N , que possui um coeficiente negativo; aumentos da velocidade de rotação causam assim uma redução na opacidade. O coeficiente de L é positivo, atingindo um máximo no nível E_2 . Finalmente o efeito da interação é positivo e crescente. A conjugação de todos estes efeitos levam à existência de um mínimo em $(N=+1; L=-1)$; o máximo situa-se por sua vez em $(N=-1; L=+1)$ no nível E_2 , e em $(N=-1; L=-1)$. É também notório o efeito do coeficiente de dispersão na opacidade, e em consequência o efeito da massa volúmica, do WRV e do RBA.

A evolução da brancura e da opacidade do papel explica-se pelos coeficientes de difusão e absorção, assim como pela sua massa volúmica. Compare-se por exemplo os Gráficos 6-2 com os Gráficos 6-10 e os Gráficos 6-12.

6.6. Coeficiente de dispersão e coeficiente de absorção da luz

As reflectância R_0 e R_∞ caracterizam a folha de papel a partir da qual são medidas, mas não as propriedades intrínsecas do material. A teoria de Kubelka-Munk é normalmente utilizada para transformar R_0 e R_∞ , conjuntamente com o conhecimento da espessura do papel ou da sua gramagem, nos coeficientes de dispersão da luz S (m^2/kg) e de absorção do papel e K (m^2/kg), que são parâmetros do material. É de salientar que os seus valores são obtidos indirectamente e apenas têm significado nos casos em que ela é válida (Leskela, 1998, p.120-122). O coeficiente de dispersão S é uma medida da capacidade de uma camada infinitesimal de papel dispersar a luz; por sua vez o coeficiente de absorção K é a medida da capacidade de uma camada infinitesimal de papel para absorver a luz. O coeficiente de dispersão S modifica-se ao longo da refinação ou quando variam os parâmetros de prensagem. O

coeficiente de absorção K diminui durante o branqueamento, ao se removerem componentes que absorvem a luz. A teoria de Kubelka-Munk requer que a estrutura do material seja homogênea e que os comportamentos ópticos dos componentes sejam mutuamente independentes, ou seja, não devem reagir opticamente. O papel não obedece estritamente a nenhuma destas condições. No entanto os resultados são geralmente aceitáveis em termos práticos (Vaarasalo, 1999, p.176), desde que S e K sejam tidos em conta numa base relativa (Silvy, 1980, p.21).

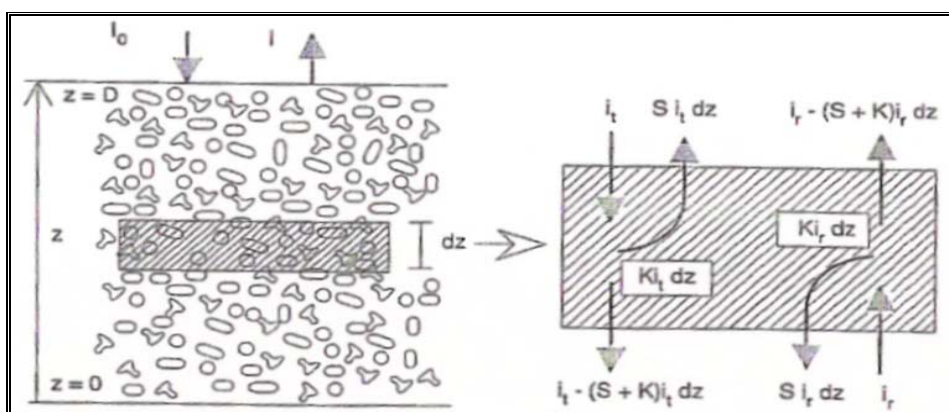


Figura 6-1 Modelo da teoria de Kubelka-Munk (Leskela, 1998).

Coeficiente de Dispersão

As fórmulas obtidas para o coeficiente de dispersão da luz em m^2/kg de cada uma das matérias-primas em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$S_p = (7,39 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (2,15 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (-3,50 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (2,00 \times 10^{-4} \cdot E^2 - 1,01 \times 10^{-1} \cdot E + 30,7)$$

Equação 6-19

$$S_E = (6,16 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-4,22 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 1,01 \times 10^{-2} \cdot E) \times L + (1,79 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 4,32 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-5,09 \times 10^{-2} \cdot E + 43,2)$$

Equação 6-20

$$S_B = (-1,51 \times 10^{-5} \cdot E^2 - 2,67 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (2,20 \times 10^{-3} \cdot E) \times L + (-2,40 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 3,65 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-6,50 \times 10^{-2} \cdot E + 36,2)$$

Equação 6-21

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 6-13 exibe a evolução do coeficiente de dispersão da luz em função da energia específica de refinação no ponto central para as distintas pastas. De realçar a correspondência dos valores deste gráfico com o da opacidade (Gráfico 6-11, p.142). Apura-se que o coeficiente de dispersão diminui de uma forma linear nos três casos, apresentando o eucalipto o maior valor para cada nível energético e o pinho o maior.

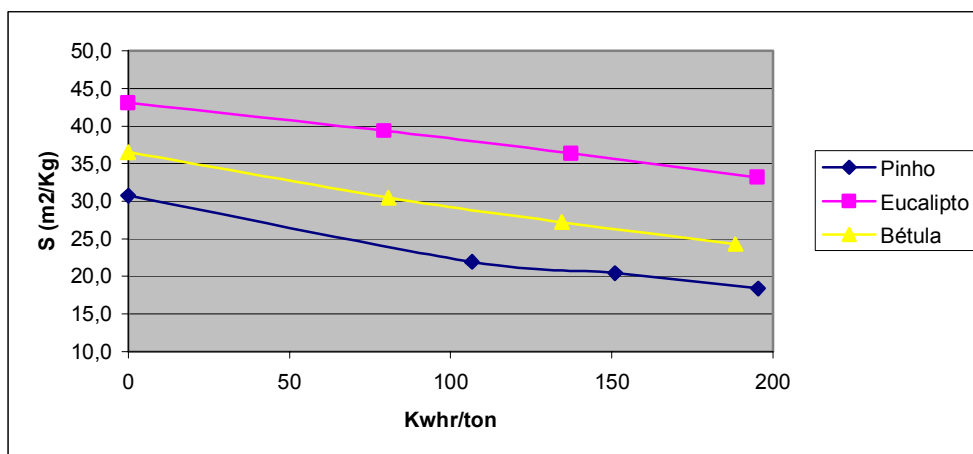
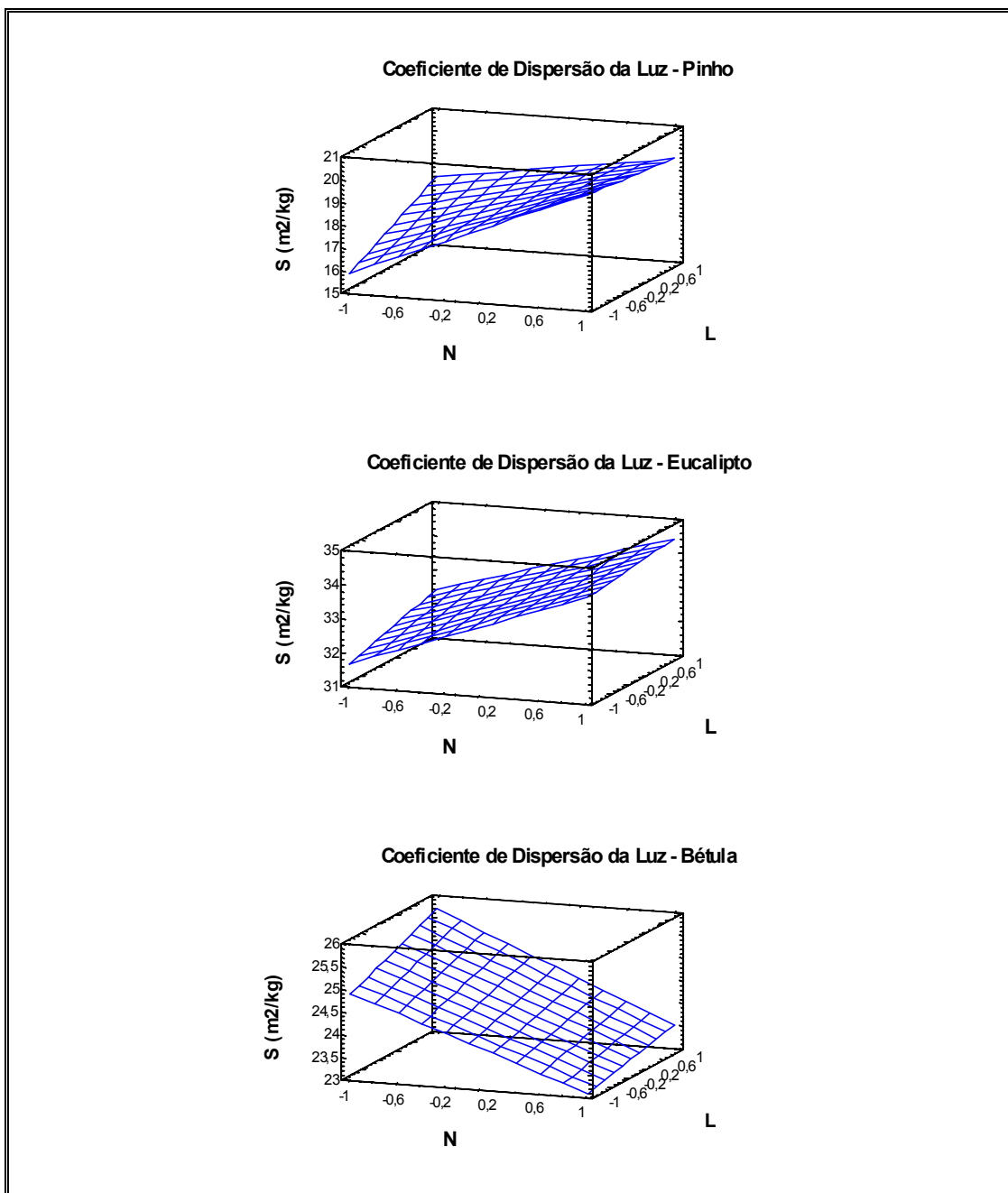


Gráfico 6-13 Coeficiente de dispersão da luz em função da energia específica de refinação no ponto central.

Os Gráficos 6-14 expõem o coeficiente de dispersão da luz no nível de energia E_2 para as três pastas. O coeficiente de dispersão do pinho tem como factor preponderante a velocidade de rotação N , que tem um valor crescente e positivo. Os coeficientes em L e de interacção têm um peso de cerca de metade daquele de N , sendo o primeiro positivo e o segundo negativo. A resultante da combinação de todos os efeitos é a existência de um máximo para $(N=+1;L=-1)$ e de um mínimo para $(N=-1;L=-1)$. O eucalipto contém coeficientes positivos em N e em L ; N é o factor mais influente, possuindo valores crescentes. O resultado final é a existência de um máximo em $(N=+1;L=+1)$, e de um mínimo para $(N=-1;L=-1)$. A bétula também tem como efeito dominante a velocidade de rotação N , com um coeficiente negativo de valor crescente. O coeficiente de L é por seu lado positivo e de valor crescente. O resultado final é a ocorrência de um máximo para $(N=-1;L=+1)$, e de um mínimo para $(N=-1;L=-1)$. Observa-se uma boa correlação com as propriedades de estrutura da folha (massa volúmica, nos Gráficos 6-2; RBA, nos Gráficos 6-18) e das pastas

(WRV, nos Gráficos 5-6), assim como com o índice de tracção das folhas (nos Gráficos 6-4), sendo os efeitos observados praticamente o inverso daqueles em S .



Gráficos 6-14 Coeficiente de Dispersão da Luz (m²/kg) no nível de energia E_2 .

Coeficiente de Absorção

As fórmulas obtidas para o coeficiente de absorção em m^2/kg de cada uma das matérias-primas em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$K_p = (-1,63 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,02 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (4,98 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 1,39 \times 10^{-4} \cdot E) \times L + (3,63 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 1,46 \times 10^{-5} \cdot E) \times N \times L + (1,93 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 3,10 \times 10^{-5} \cdot E + 0,13)$$

Equação 6-22

$$K_E = (8,42 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 1,07 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (8,42 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 1,07 \times 10^{-4} \cdot E) \times L + (-4,62 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 8,54 \times 10^{-5} \cdot E) \times N \times L + (1,39 \times 10^{-4} \cdot E + 0,119)$$

Equação 6-23

$$K_B = (-1,39 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 3,07 \times 10^{-5} \cdot E) \times N + (2,03 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 3,79 \times 10^{-5} \cdot E) \times L + (-1,42 \times 10^{-5} \cdot E) \times N \times L + (8,79 \times 10^{-5} \cdot E + 0,152)$$

Equação 6-24

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 6-15 exhibe o coeficiente de absorção da luz em função da energia específica de refinação no ponto central para as três matérias-primas. Apesar do curioso ponto de cruzamento das curvas, pode-se afirmar que apresentam uma tendência geral de crescimento. A bétula e o eucalipto muito possivelmente terão atingido um patamar, a primeira após E_1 e a segunda em E_2 ; para o pinho por sua vez parece ocorrer um aumento da taxa de crescimento do coeficiente de absorção em E_2 .

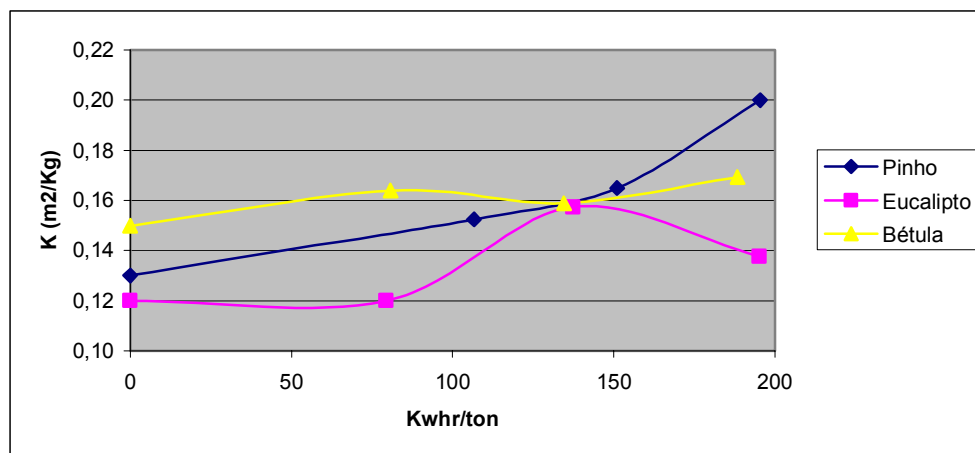
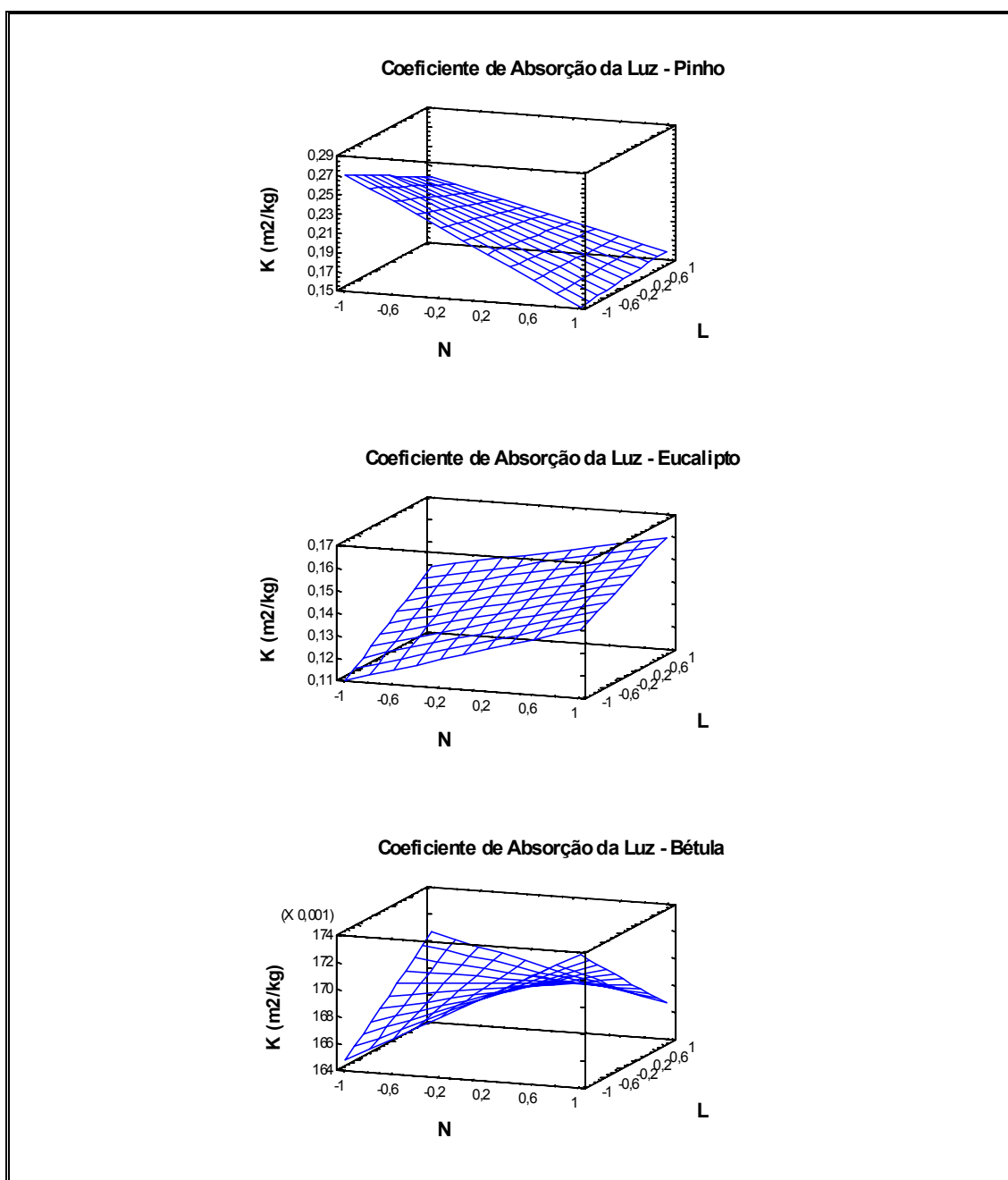


Gráfico 6-15 Coeficiente de absorção da luz em função da energia específica de refinação no ponto central.

Os Gráficos 6-16 ostentam o coeficiente de absorção da luz das distintas matérias-primas em função de N e L no nível de energia E_3 . O pinho tem como coeficiente mais influente a velocidade de rotação N, que está dotado de sinal negativo. A carga L possui também sinal negativo, mas está sujeita à influência do factor de interação. O efeito global resulta na existência de um máximo no ponto $(N=-1;L=-1)$, sendo o respectivo mínimo situado no ponto $(N=+1;L=-1)$. Para os casos do eucalipto e da bétula só foi possível detectar efeitos significativos no nível de



Gráficos 6-16 Coeficiente de Absorção da Luz (m^2/kg) no nível de energia E_3 .

energia E_3 . O eucalipto possui aí coeficientes positivos em N e em L, resultando num máximo para (N=+1;L=+1) e um mínimo para (N=-1;L=-1). A bétula possui por sua vez dois máximos locais para (N=+1;L=-1) e (N=-1;L=+1), e dois mínimos locais para (N=-1;L=-1) e (N=+1;L=+1).

Verifica-se uma boa correlação do coeficiente de absorção com o teor de finos. Este facto pode ser explicado pelo facto de a fracção de finos possuir uma coloração mais próximo do amarelo, resultante de uma maior teor em lenhina. Desta maneira, o coeficiente de absorção reflecte a dispersão de elementos finos durante a refinação. Vejam-se os Gráficos 5-15 e os Gráficos 6-16.

6.7. Área e energia de ligação.

Área relativa de Ligação

Por definição, a área relativa de ligação (RBA) é definida como sendo a razão entre a área da superfície das fibras envolvidas em ligação e a área total das fibras (Levlin, 1999, p.24). O método mais directo de se medir a RBA é através da observação no microscópio (óptico ou electrónico). Este método, inicialmente utilizado por Page em 1962, revela-se extremamente demorado e meticuloso. Métodos indirectos de medição do RBA foram desenvolvidos, sendo de destacar a técnica da adsorção de azoto, na qual a área de ligação é determinada usando a equação de Brunauer, Emmet e Teller (BET); este método envolve a produção de folhas sem ligações entre fibras, recorrendo à permuta de solvente (troca de água por benzeno) ou uma técnica de secagem por dispersão numa suspensão fibrosa diluída numa camada de polietileno. Utilizou-se no presente trabalho o método óptico para medir a área relativa de ligação, que assenta na teoria de Kubelka-Munk, uma teorias muito utilizada nos domínios das aplicações papelerias, se bem que por vezes com validade limitada (Silvy, 1961; 1980, p.23). Os pressupostos sobre os quais assenta este método são os seguintes:

1. O coeficiente de dispersão específico S é uma função linear da área superficial livre A , de acordo com a expressão $S = k \cdot A + i$, em que k e i são constantes.

2. O coeficiente de dispersão para uma folha completamente sem ligações S_i é determinado pela extrapolação da curva de S em relação à resistência de tracção até ao valor de resistência nula. Daqui é possível obter-se o valor estimado de i .
3. Sendo a área total da fibra A_t , tem-se que a área ligada A_L é determinada por $A_L = A_t - A = \frac{S_t - S}{k}$, pelo que a área relativa de ligação é dada por $RBA = \frac{A_L}{A_t} = \frac{S_t - S}{S_t - i}$.

A relação linear entre o coeficiente de dispersão da luz e a área superficial livre ainda não foi provada pela física da interacção entre a luz e o papel. No entanto, já foi experimentalmente comprovado que existe uma excelente correlação linear entre o coeficiente de dispersão S e área superficial A_{BET} obtida pela técnica de adsorção do azoto (Silvy, 1980, p.46-48; Uesaka, 1984, p.386-388). Foi igualmente demonstrado que os coeficientes k e i mantêm-se essencialmente constantes para graus de refinação variáveis e diferentes níveis de pressão durante a prensagem em húmido; no entanto são dependentes do tipo de pasta e do comprimento de onda utilizado. Assim o pressuposto de relação linear é limitado ao mesmo tipo de pasta e ao mesmo comprimento de onda. Para o pinho obteve-se um valor de i de $37,1\text{m}^2/\text{kg}$, sendo $44,91\text{m}^2/\text{kg}$ para a bétula e $52,21\text{m}^2/\text{kg}$ para o eucalipto, utilizando-se um comprimento de onda de 557nm .

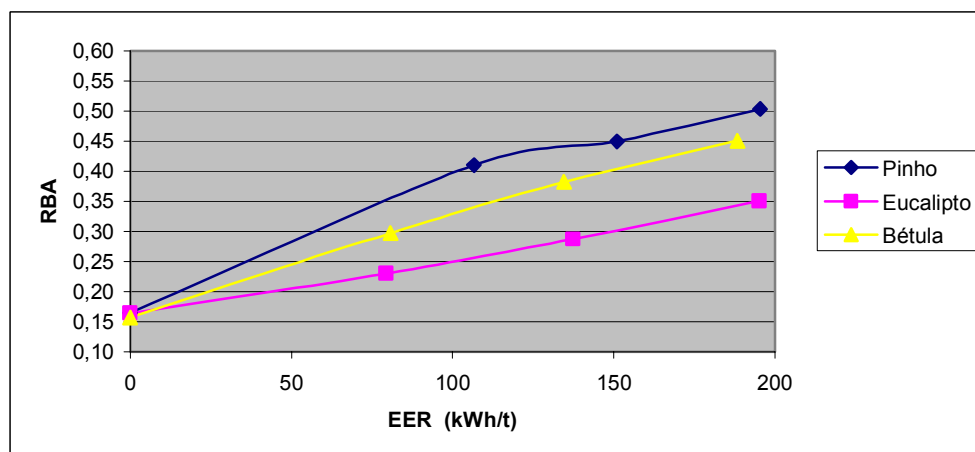


Gráfico 6-17 Área relativa de ligação (RBA) em função da energia específica de refinação no ponto central.

As equações obtidas para a evolução do RBA determinados pelo método óptico em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$RBA_p = (2,65 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 2,43 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (1,20 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 7,66 \times 10^{-5} \cdot E) \times L + (3,11 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 1,49 \times 10^{-4} \cdot E) \times N \times L + (-5,76 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 2,83 \times 10^{-2} \cdot E + 0,166)$$

Equação 6-25

$$RBA_E = (6,73 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 2,42 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (8,66 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 2,06 \times 10^{-4} \cdot E) \times L + (-1,15 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 3,58 \times 10^{-5} \cdot E) \times N \times L + (1,09 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 7,47 \times 10^{-4} \cdot E + 0,164)$$

Equação 6-26

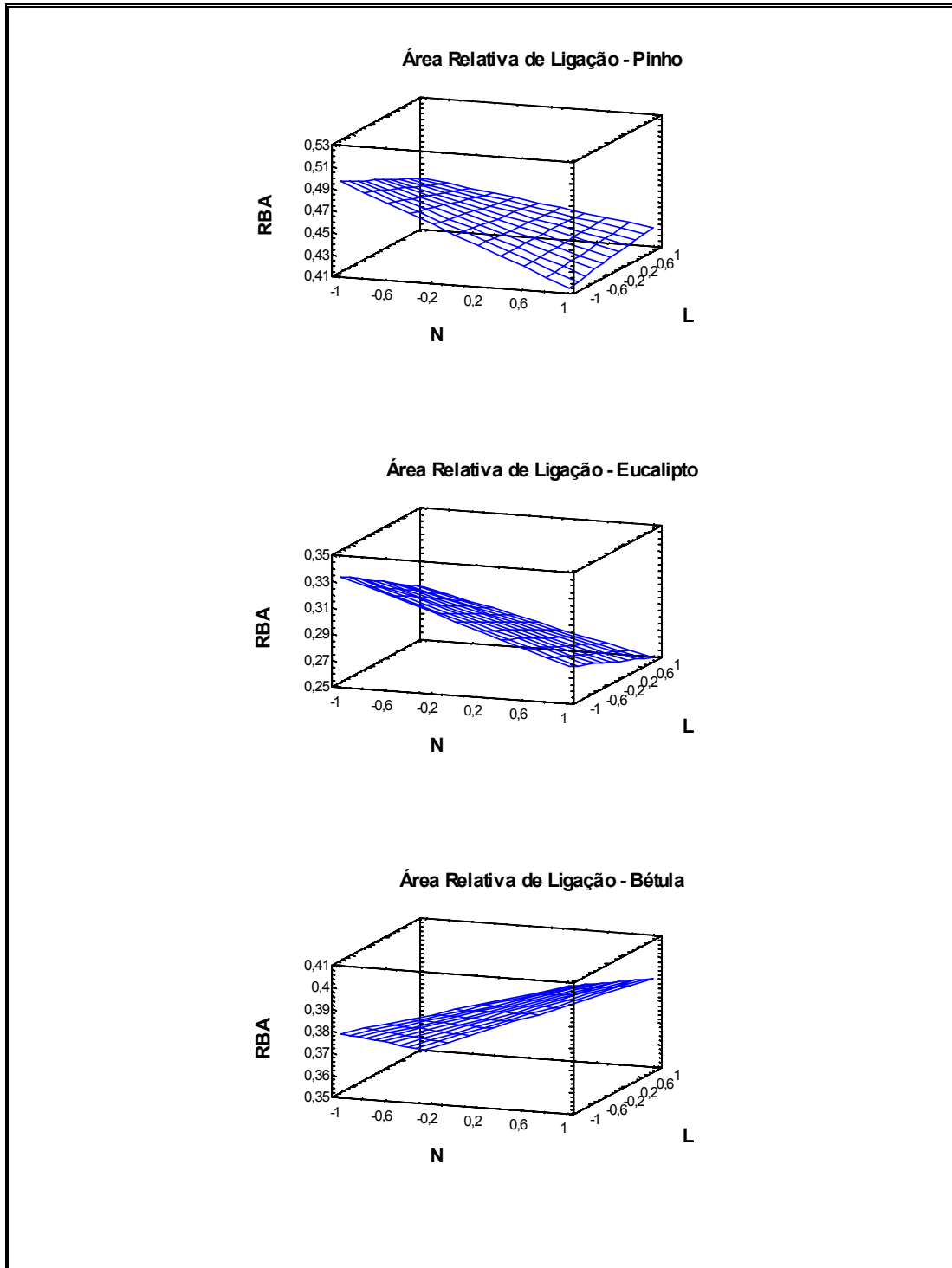
$$RBA_B = (5,92 \times 10^{-7} \cdot E^2 + 2,24 \times 10^{-5} \cdot E) \times N + (2,56 \times 10^{-7} \cdot E^2 - 9,41 \times 10^{-5} \cdot E) \times L + (1,19 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 1,90 \times 10^{-4} \cdot E) \times N \times L + (-1,87 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,92 \times 10^{-3} \cdot E + 0,157)$$

Equação 6-27

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

O Gráfico 6-17 ostenta a área relativa de ligação (RBA) das diferentes pastas em função da energia específica de refinação no ponto central. A área relativa de ligação das diferentes pastas não refinadas é praticamente igual; no entanto, a refinação tem efeitos diversos sobre o RBA. Pode-se apurar que a área relativa de ligação tem um crescimento aproximadamente linear para a bétula e o eucalipto, enquanto que para o pinho parece que até ao nível de energia E_1 a evolução é mais rápida e depois cresce mais lentamente de forma linear. Para cada valor de energia específica de refinação o valor de RBA cresce do eucalipto para a bétula e o pinho silvestre. O eucalipto é a matéria-prima que desenvolve mais dificilmente a área ligada, enquanto que ocorre para o pinho. Esta fibra exhibe largura elevada e relativamente baixa massa linear, logo um índice de Runkel³⁸ baixo, pelo que é expectável que sofra colapso com muita facilidade. O eucalipto apresenta um índice de Runkel elevado e, conseqüentemente, tem menor tendência para sofrer colapso.

³⁸ O índice de Runkel é dado pela razão entre o dobro da espessura média da parede da fibra e o diâmetro do lúmen.



Gráficos 6-18 Área Relativa de Ligação (RBA) no nível de energia E_2 .

Os Gráficos 6-18 apresentam a área relativa de ligação das diferentes matérias-primas em função de N e de L no nível de energia E_2 . No caso do pinho o factor predominante é N, sendo o seu coeficiente negativo; o coeficiente em L é também negativo, mas é absorvido pelo factor de interacção. O eucalipto apresenta também

factores negativos em N e em L, tendo aqui o primeiro factor um peso relativo superior. Finalmente no caso da bétula o factor mais influente é a velocidade de rotação N, mas aqui o seu coeficiente é positivo; isto significa que, ao contrário das outras matérias-primas, aumentos da velocidade de rotação provocam na bétula aumentos na área relativa de ligação. Em sùmula, pode-se constatar que o RBA correlaciona com a massa volùmica do papel. Por outro lado, os aumentos de N parecem ser nefastos para o RBA do pinho e do eucalipto; o contrário ocorre para a bétula, resultados que correspondem à influência da rotação sobre as variações de hidratação das fibras (veja-se o Gráficos 5-6, p.107).

Energia da Ligação Nordman

O método utilizado para medir a energia da ligação foi o método de Nordman (Van den Akker, 1982, p.162-163; Uesaka, 1984, p.390-398). O método assenta no facto de existir uma relação linear entre a energia dissipada durante um ciclo de tracção-relaxamento numa folha de papel e o aumento do coeficiente de dispersão da luz. Este facto conduziu à criação do que na área da ciência do papel se apelida de “energia da ligação Nordman”. Este valor é obtido pela razão entre a energia dissipada durante um ciclo de tracção e a variação do coeficiente de dispersão. Estes valores são proporcionais à energia de ligação, tendo em conta que se utiliza a variação do coeficiente de difusão, que é proporcional à área de ligação em absoluto. Van den Akker indicou a existência de uma discrepância entre a energia de ruptura de ligações de hidrogénio fibra-fibra (da ordem de 10^{-2} e 10^{-3} J/m²) e a energia Nordman (23 J/m²), que foi corrigida com base em dados da adsorção de azoto. O autor conclui então que a energia de Nordman depende simultaneamente da força requerida para romper as ligações e da energia elástica dissipada nas fibras. Métodos alternativos envolvem a utilização da equação de Page para a resistência à tracção (Page, 1969) ou testes que medem a resistência na direcção Z. Esta pode ser determinada utilizando uma força de tracção ou de delaminação (como por exemplo o equipamento Scott-Bond). Métodos laboriosos e complexos foram desenvolvidos para quantificar directamente a energia de ligação entre fibras.

As equações obtidas para a energia da ligação Nordman (kJ/m²) em função das condições de refinação e da energia específica de refinação aplicada (kWh/t) são as seguintes:

$$EL_p = (-8,12 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,58 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-1,77 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 3,00 \times 10^{-3} \cdot E) \times L \\ + (-2,40 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 8,33 \times 10^{-4} \cdot E) \times N \times L + (-2,01 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 6,92 \times 10^{-3} \cdot E + 0,362)$$

Equação 6-28

$$EL_E = (-1,93 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,16 \times 10^{-4} \cdot E) \times N + (-2,49 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 3,68 \times 10^{-4} \cdot E) \times L \\ + (3,74 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 7,90 \times 10^{-4} \cdot E) \times N \times L + (5,88 \times 10^{-6} \cdot E^2 - 3,97 \times 10^{-4} \cdot E + 0,632)$$

Equação 6-29

$$EL_B = (-1,03 \times 10^{-5} \cdot E^2 + 1,92 \times 10^{-3} \cdot E) \times N + (-9,61 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,52 \times 10^{-3} \cdot E) \times L \\ + (-6,28 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 1,15 \times 10^{-3} \cdot E) \times N \times L + (-7,48 \times 10^{-6} \cdot E^2 + 2,64 \times 10^{-3} \cdot E + 0,416)$$

Equação 6-30

Os valores experimentais e as respectivas curvas de ajuste destas expressões estão representados no Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste.

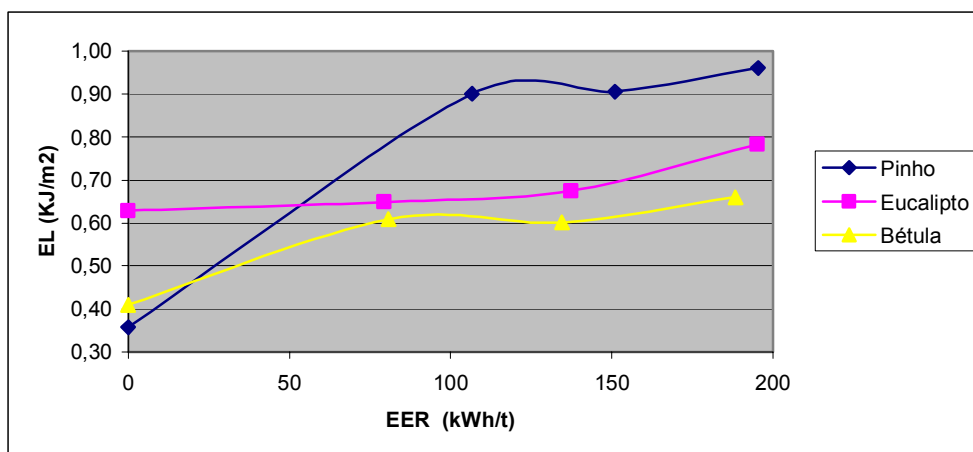
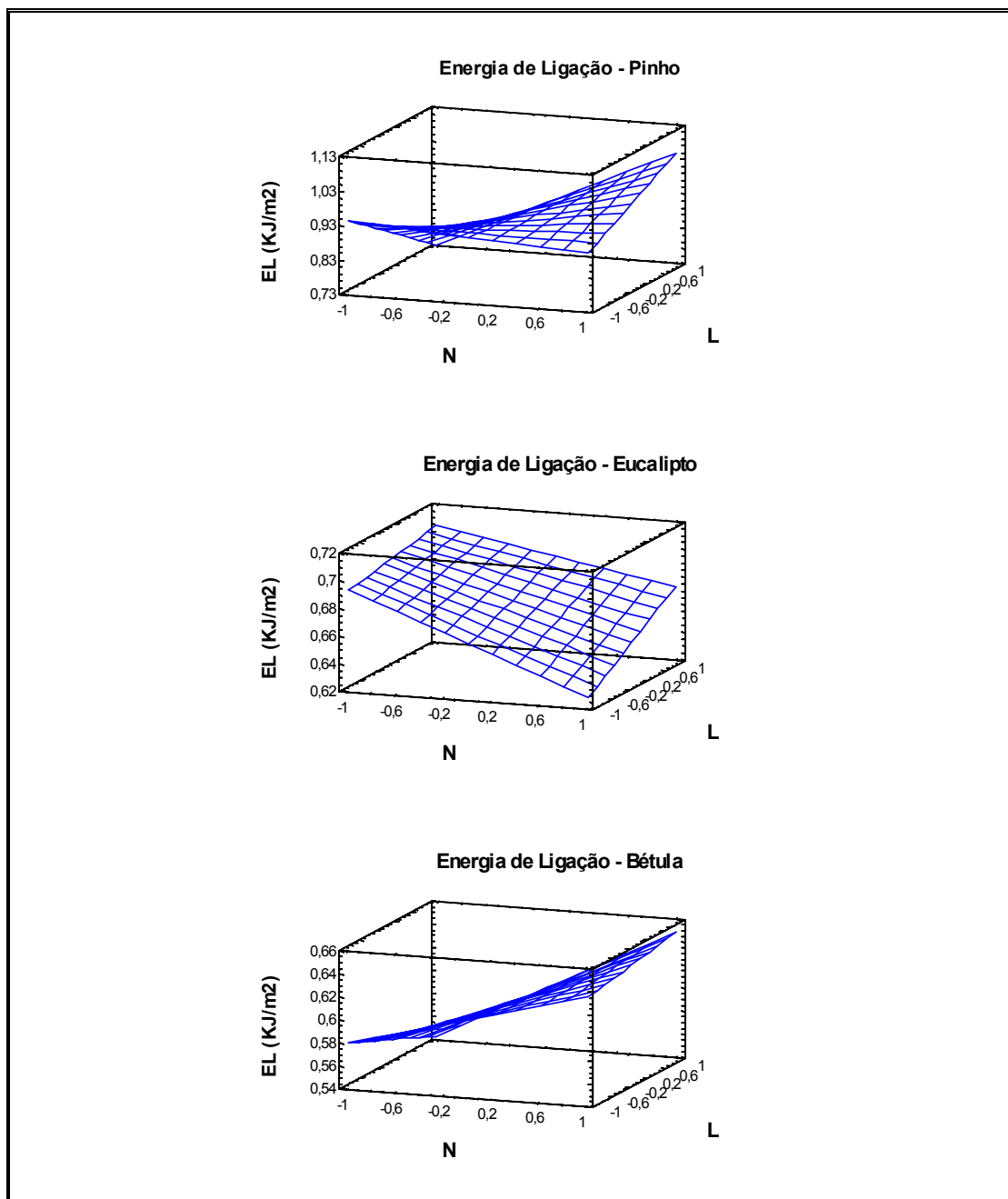


Gráfico 6-19 Energia da ligação Nordman em função da energia específica de refinação no ponto central.

O Gráfico 6-19 exibe a energia da ligação Nordman em função da energia específica de refinação no ponto central para as diferentes pastas. Verifica-se que o pinho apresenta uma elevada taxa de crescimento desta variável, atingindo um patamar após E_1 (cerca de 107kWh/t). O eucalipto por sua vez evolui muito lentamente e sofre um crescimento mais acentuada entre os dois últimos níveis de energia. A bétula apresenta um comportamento análogo ao pinho, parecendo atingir um patamar após E_1 (cerca de 80kWh/t). Em termos de análise comparativa, constata-

se que para os valores experimentais obtidos para a energia de ligação Nordman após o começo da refinação, esta variável cresce da bétula para o eucalipto e finalmente o pinho.



Gráficos 6-20 Energia da Ligação Nordman (kJ/m^2) no nível de energia E_2 .

Os Gráficos 6-20 mostram a energia da ligação Nordman das diversas matérias-primas em função de N e de L no nível de energia E_2 . Da análise do pinho pode constatar-se a existência de dois máximos locais; um ocorre para $N=-1$ e $L=-1$,

sendo o outro em $N=+1$ e $L=+1$. Por outro lado, existem dois mínimos locais, um em $N=-1$ e $L=+1$ e o outro em $N=+1$ e $L=-1$. Analisando individualmente cada uma das condições de refinação, o valor da energia de ligação Nordman cresce normalmente ao longo da refinação; nas condições de refinação O ($N=0;L=0$) e D ($N=-1;L=+1$) atingiu-se um máximo e depois ocorreu um decréscimo. No caso do eucalipto, tem-se como factor preponderante a velocidade de rotação N , que possui um valor negativo crescente; desta forma a energia de ligação decresce com o aumento da velocidade de rotação. A energia de ligação Nordman atinge ainda o seu máximo para $N=-1$ e $L=+1$. Constata-se também aqui o aumento da energia de ligação com o evoluir da refinação. Na bétula tem-se inicialmente como efeito principal a velocidade de rotação N , tal como ocorreu para o eucalipto. No entanto o valor desse efeito vai diminuindo com a evolução da refinação; assim, no nível de energia E_3 os efeitos de N e de L são praticamente nulos. Outro facto de salientar é o aumento da energia de ligação com a refinação, com a excepção das condições C ($N=+1; L=+1$), onde ocorre um decréscimo da energia de ligação com a evolução da refinação.

A subida inicial do valor da energia de ligação que se observa para o pinho e a bétula pode ser explicada pela melhoria da conformabilidade das fibras resultante da sua hidratação. Por sua vez, o patamar atingido poderá resultar do aumento da uniformidade da superfície das fibras, como consequência da presença de finos.

6.8. Análise global e conclusões sobre as propriedades do papel

Neste capítulo acompanhou-se a evolução das propriedades do papel em função das condições de refinação, para a resinosa e as folhosas em estudo. Podem extrair-se as seguintes conclusões básicas sobre o comportamento das propriedades do papel e das ligações entre fibras:

1. Tal como as propriedades da pasta e das fibras, é factível estabelecerem-se equações globais para cada matéria-prima, relacionando cada propriedade do papel e das ligações com a energia específica de refinação e com as propriedades operacionais do refinador Valley, nomeadamente a velocidade de rotação do rotor e a carga aplicada. Para cada matéria-prima obtiveram-se relações para a massa volúmica, o índice de tracção, o índice de rebentamento, o

índice de rasgamento, as propriedades ópticas, designadamente a brancura, a opacidade e os coeficientes de dispersão e absorção da luz e ainda as propriedades da ligação, especificamente a área relativa de ligação e a energia de ligação.

2. Pode-se, tal como anteriormente para as propriedades da pasta e das fibras, fazer um estudo comparativo do comportamento das diferentes pastas através da análise dos gráficos de evolução das propriedades no ponto central O ($N=0$; $L=0$) com a energia específica de refinação, que estabelece um comportamento médio das pastas para cada propriedade.
3. Pode-se igualmente fazer um estudo para cada pasta do efeito das condições de operação do refinador, i.e. a velocidade de rotação do rotor e a carga aplicada, sobre a evolução das propriedades acima referidas em cada nível de energia.
4. A resistência ao rasgamento, para o pinho, diminui com a refinação, aumentando pelo contrário para as folhosas.
5. Na análise comparativa das diferentes pastas no seu ponto central, o pinho manifesta em cada nível da energia específica de refinação o valor máximo para a área relativa da ligação (Gráfico 6-17, p.151), a energia da ligação Nordman (Gráfico 6-19, p.155) e em consequência os índices de tracção (Gráfico 6-3, p.130), de rebentamento (Gráfico 6-5, p.133) e de rasgamento (Gráfico 6-5, p.133). Por sua vez, apresenta valores mínimos para o coeficiente de dispersão da luz (Gráfico 6-13, p.146), a opacidade (Gráfico 6-11, p.142) e a brancura (Gráfico 6-9, p.139).
6. O eucalipto ostenta, em termos comparativos, valores máximos em cada nível de energia específica de refinação para o coeficiente de dispersão da luz, a opacidade e a brancura. Inversamente, apresenta valores mínimos para a massa volúmica (Gráfico 6-1, p.127), a área relativa de ligação e para os índices de tracção, de rebentamento e rasgamento.

7. A bétula manifesta, quando comparada com as outras matérias-primas para a mesma energia específica de refinação, o valor máximo da massa volúmica e o mínimo para a energia de ligação Nordman.
8. Em relação à análise comparativa dos efeitos das variáveis N e L para o pinho, podem equiparar-se os efeitos de N e de L na tensão tangencial τ_t (Gráficos 4-2, p.76), naturalmente na carga específica de aresta SEL (Gráfico 3-5, p.69) e no coeficiente de fricção f (Gráficos 4-3, p.78) com os efeitos sobre a brancura (Gráficos 6-10, p.140) e os coeficientes de dispersão (Gráficos 6-14, p.147) e de absorção da luz (Gráficos 6-16, p.149). Podem igualmente observar-se efeitos análogos sobre o grau de refinação SR (Gráficos 5-2, p.101) e tempo de drenagem DT (Gráficos 5-4, p.104) e o índice de tracção (Gráficos 6-4, p.132), o índice de rebentamento (Gráficos 6-6, p.134) e a opacidade (Gráficos 6-12, p.143). Em todas estas variáveis observam-se efeitos de N e de L. Já a massa volúmica (Gráficos 6-2, p.129) apresenta influência essencialmente de N, de forma análoga ao WRV (Gráficos 5-6, p.107) e ao teor de microfibrilas (Gráficos 5-13, p.118) no capítulo anterior.
9. Relativamente ao eucalipto, podem estabelecer-se paralelismos entre a massa volúmica (Gráficos 6-2, p.129) e a área relativa de ligação (Gráficos 6-18, p.153), essencialmente dependentes de N e com coeficiente negativos. Por outro lado, verificam-se efeitos similares em relação a N, mas podendo observar-se a influência de L, nas seguintes variáveis: energia da ligação Nordman (Gráficos 6-20, p.156), índice de tracção e o índice de rebentamento. Apresentam ainda efeitos de N, mas com sinal contrário, a brancura, a opacidade e os coeficientes de dispersão e de absorção.
10. A bétula apresenta como factor preponderante em diversas variáveis a velocidade de rotação N. Tal é o caso da massa volúmica, da área relativa de ligação, da energia de ligação Nordman e dos índices de tracção, de rebentamento e de rasgamento, que apresentam coeficientes positivos naquele factor. Também é esta a tendência do grau de

refinação SR, do tempo de drenagem DT e do WRV. A opacidade e o coeficiente de dispersão apresentam o mesmo predomínio de N, mas agora com sinal negativo; efeitos análogos a estes últimos foram observados na bétula para o coeficiente de fricção, a taxa de evolução do entreferro (Gráficos 4-6, p.81) e o comprimento aritmético da fibra (Gráficos 5-8, p.110). A brancura e a opacidade, para além do efeito similar de N com sinal negativo, dependem também do efeito de L.

11. A evolução das propriedades dos papéis com a pasta de bétula em função da velocidade N tem frequentemente evoluções inversas daquelas observadas para o pinho e o eucalipto, tal como já tinha sido constatado em relação às propriedades da suspensão. Tal facto é consubstanciado pelos valores obtidos por Levlin (1975).

7. Avaliação e Otimização

7.1. Escolha da matéria-prima

A Tabela 7-1 estabelece a análise comparativa das três matérias-primas relativamente às diferentes variáveis estudadas. Compilam-se nesta tabela os valores representativos de todas aquelas variáveis no seu ponto central ($N=0$; $L=0$) para o pinho silvestre, o eucalipto e a bétula. O primeiro grupo é constituído pelas variáveis hidromecânicas, o segundo abrange as propriedades da pasta e das fibras, incluindo-se no último grupo as propriedades do papel e das ligações entre as fibras.

Variáveis hidromecânicas

Algumas variáveis hidromecânicas são analisadas utilizando os seus valores médios ao longo de toda a refinação, sendo as restantes analisadas no instante inicial da refinação. No primeiro grupo inclui-se a tensão normal τ_n (kPa), a tensão tangencial τ_t (kPa), o coeficiente de fricção f e o rendimento energético η (%). No segundo grupo inclui-se a evolução do entreferro de/dt (mm/s), o entreferro inicial e_0 (mm), o gradiente de velocidade G (s^{-1}) e a viscosidade aparente μ_{ap} (Pa.s). A tensão normal é evidentemente idêntica nos três casos quando se aplica a mesma carga. Por sua vez a menor tensão tangencial ocorre para o pinho, sendo a do eucalipto 25% superior e a da bétula 56%. Um raciocínio análogo pode ser feito em relação ao coeficiente de fricção, sendo este dado pela razão entre a tensão tangencial e a tensão normal. O entreferro inicial do pinho tem um valor de 0,217mm, sendo o do eucalipto 22% daquele valor e o da bétula é por sua vez 33%. Quanto à evolução do entreferro a maior é a da bétula com um valor de $-18,2 \times 10^{-4}$ mm/s, sendo a do pinho 48% desse valor e a do eucalipto apenas 8%. Por sua vez o maior gradiente de velocidade é o do eucalipto, que possui um valor $125.767s^{-1}$; a bétula tem um valor de G que é 64% daquele valor, e o do pinho é somente 19%. Quanto à viscosidade aparente tem-se que a maior é a do pinho, com um valor de 0,711Pa.s; segue-se a bétula com um valor de 0,372Pa.s e finalmente o eucalipto com 0,186Pa.s. O maior rendimento energético é o da bétula, com um valor de 27,4%; o valor do rendimento do eucalipto é 20% inferior e o do pinho por sua vez é 42% menor. Presencia -se assim que a aumentos no entreferro inicial e_0 correspondem a aumentos na viscosidade aparente μ_{ap} e a

reduções no rendimento energético η . A velocidade de evolução do entreferro estará relacionada com as propriedades físicas e morfológicas das fibras. Em relação ao coeficiente de fricção f e à tensão tangencial τ_t , o pinho apresenta como seria de esperar os menores valores, atendendo às relações anteriormente obtidas em 4.4 (p.87-89). Os maiores valores são os da bétula; apesar de apresentar um maior entreferro inicial, a bétula apresenta um decréscimo acelerado dessa variável, o que resulta em valores médios para as tensões tangenciais e coeficientes de fricção superiores.

Propriedades da pasta e das fibras

Quanto às propriedades da pasta e das fibras, estas são analisadas a um nível de energia específica de refinação de 195,5kWh/t, que se pode considerar um limite superior de energia específica de refinação nos ensaios efectuados. Neste grupo incluem-se o grau de refinação ($^{\circ}$ SR), o tempo de drenagem DT (s), o teor de finos (%), o WRV (%), o comprimento aritmético das fibras L_a (mm), o zero-span ZS (Nm/g), o índice de flexibilidade IF e o teor em macrofibrilas MF (%). O pinho e a bétula apresentam valores semelhantes para o grau de refinação; assim o pinho tem um grau de refinação de 58,3 $^{\circ}$ SR e um tempo de drenagem de 20,5s, tendo a bétula o mesmo valor para a primeira variável e 21,6s para a segunda. O eucalipto apresenta por sua vez valores inferiores, sendo estes respectivamente 50,1 $^{\circ}$ SR e 12,9s. Para o nível de teor de finos ocorre curiosamente uma inversão em termos comparativos; o eucalipto apresenta um teor de finos de 13,5%, sendo 10,6% para o pinho e 11,0% para a bétula. No que respeita ao grau de hidratação, o pinho apresenta o maior valor para o WRV, sendo este 135. A bétula apresenta um valor de 127 e o eucalipto 121. Quanto ao comprimento aritmético das fibras, o pinho é naturalmente a maior, com 0,95mm; seguem-se a bétula com 0,69mm, e finalmente o eucalipto com 0,62mm. Tendo em conta os respectivos comprimentos aritméticos iniciais das fibras, a bétula sofreu uma redução de 27% no seu comprimento, o pinho de 18% e o eucalipto apenas 7,5%. O maior valor para o zero-span é o do pinho, sendo igual a 144 Nm/g; o valor do eucalipto é 11% inferior e o da bétula é por sua vez 22% inferior. No que concerne ao índice de flexibilidade o maior é o do eucalipto, sendo 62,3; segue-se o pinho com 60,5 e finalmente a bétula com 57,6. A bétula contém o maior teor em macrofibrilas (0,82%), o do eucalipto é 13% inferior e o do pinho é 19,5% menor.

Propriedades do papel e da ligação

As propriedades do papel e da ligação são igualmente comparadas a um nível de energia específica de refinação de 195,5kWh/t. As propriedades do papel incluídas são a massa volúmica ρ (kg/m³), o índice de tracção IT (Nm/g), o índice de reventamento BI (kPa.m²/g), o índice de rasgamento IR (N.m²/kg), a brancura BR (%), a opacidade OP (%), o coeficiente de dispersão S (m²/kg) e o coeficiente de absorção K (m²/kg); as propriedades da ligação estudadas são a área relativa de ligação RBA e a energia de ligação Nordman EL (kJ/m²). O maior valor para a massa volúmica é da bétula, sendo 844kg/m³; o do pinho é 3% inferior e o eucalipto 7%. No que respeita às propriedades da ligação, o pinho apresenta os melhores valores quer no ponto de vista da área relativa de ligação RBA, quer da energia da ligação EL; assim o seu RBA é 0,50 e a sua energia de ligação Nordman é 0,96kJ/m². Quanto ao RBA, a bétula apresenta um melhor valor que o eucalipto, invertendo-se a situação no que respeita à energia da ligação; assim o eucalipto tem um RBA de 0,35 e uma energia de ligação Nordman de 0,78kJ/m², sendo os valores correspondentes para a bétula respectivamente 0,47 e 0,68kJ/m². As propriedades de resistência são naturalmente superiores para o pinho, sendo o seu índice de tracção igual a 92,4N.m/g, o seu índice de reventamento igual a 7,3kPa.m²/g e o seu índice de rasgamento 9,5N.m²/kg. A bétula apresenta melhores propriedades de resistência do que o eucalipto; assim o índice de tracção da bétula é 8% superior ao do eucalipto, o índice de reventamento 12% maior e o índice de rasgamento 3%. Já no que concerne à propriedades ópticas, o eucalipto apresenta melhores características que a bétula; o pinho apresenta os piores valores. Assim, o eucalipto apresenta em relação à bétula um valor de brancura superior em 4,3 unidades, a opacidade é superior em 12,3 unidades, o coeficiente de dispersão da luz é 42% superior e o coeficiente de absorção é 18% inferior. Em síntese, o pinho apresenta as melhores propriedades de resistência e o eucalipto as melhores propriedades ópticas. Por sua vez a bétula apresenta a evolução da refinação mais rápida, tendo ainda melhores propriedades de resistência comparativamente ao eucalipto. Quanto ao rendimento energético, a bétula apresenta o maior valor e o pinho por sua vez o menor.

EER	Variáveis	Pinho	Eucalipto	Bétula
kWh/t	Hidromecânicas			
—	τ_N (kPa)	102,8	102,8	102,8
—	τ_T (kPa)	16,6	20,7	25,9
—	f	0,161	0,201	0,252
—	SEL (J/m)	0,300	0,376	0,471
0	$\frac{de}{dt}$ (mm/s)	$-8,7 \times 10^{-4}$	$-1,4 \times 10^{-4}$	$-18,2 \times 10^{-4}$
0	e_0 (mm)	0,217	0,047	0,071
0	G (s ⁻¹)	24.186	125.767	80.496
0	μ (Pa.s)	0,711	0,186	0,372
—	η (%)	16,0	22,0	27,4
	Pasta			
195,5	°SR	58	50	58
	DT (s)	20,5	12,9	21,6
	Finos (%)	10,6	13,5	11,0
	WRV (%)	135	121	127
	L_a (mm)	0,95	0,62	0,69
	ZS (Nm/g)	144	128	112
	IF	60,5	62,3	57,6
	MF (%)	0,66	0,72	0,82
	Papel			
195,5	ρ (kg/m ³)	818	787	844
	RBA	0,50	0,35	0,47
	EL (kJ/m ²)	0,96	0,78	0,68
	IT (N.m/g)	92,4	64,9	70,2
	BI (kPa.m ² /g)	7,3	4,1	4,6
	IR (N.m ² /kg)	9,5	7,3	7,5
	BR (%)	78,7	87,0	82,7
	OP (%)	61,7	74,6	62,3
	S (m ² /kg)	18,4	33,2	23,4
	K (m ² /kg)	0,20	0,14	0,17

Tabela 7-1 Variáveis para análise comparativa entre matérias-primas no ponto central.

7.2. *Análise das condições de refinação*

A Tabela 7-2, a Tabela 7-3 e a Tabela 7-4 apresentam os dados que servem de base à análise do efeito das condições de operação N e L sobre as diferentes variáveis estudadas para as três matérias-primas. As variáveis encontram-se igualmente divididas em variáveis hidromecânicas, nas relativas às propriedades da pasta e das fibras e finalmente as que se referem às propriedades do papel e das ligações. Na primeira coluna apresenta-se o sentido da evolução do ponto central O, que é dado pela equação da propriedade em análise para $N=0$ e $L=0$; o símbolo “↑” significa que ocorre um crescimento da variável com o decorrer da refinação; o símbolo “↓” que ocorre uma diminuição e finalmente o símbolo “→” significa que ela se mantém constante. Quando há mudança do sentido de evolução passando-se por um máximo, este é representado por “Max”; no caso de um mínimo utiliza-se a expressão “Min”. As colunas seguintes apresentam os sinais dos coeficientes de N, de L e de $N \times L$ na expressão de ajuste da propriedade em análise; o símbolo “+” aplica-se quando o sinal é positivo, “-” quando é negativo e “0” quando este é nulo. No caso de haver um coeficiente dominante na expressão da equação de ajuste, este está expresso na coluna correspondente; este poderá ser N, L ou o próprio factor de interacção entre variáveis $N \times L$. As duas últimas colunas referem-se às condições de refinação na qual a variável em estudo atinge um valor máximo e àquela que atinge um valor mínimo; as condições de refinação em análise são respectivamente O ($N=0$; $L=0$), A ($N=+1$; $L=-1$), B ($N=-1$; $L=-1$), C ($N=+1$; $L=+1$) e D ($N=-1$; $L=+1$), conforme definidas anteriormente (Figura 3-3, p.63). Quando ocorrem mudanças ao longo da refinação, quer do sentido da evolução do ponto central, quer do sinal de coeficientes, seja ainda do factor dominante ou das condições de refinação em que se atinge um máximo ou um mínimo, estas mudanças são representadas pela sua sequência nas células da tabela correspondentes.

Pinho silvestre

A Tabela 7-2 apresenta as variáveis em análise para o pinho. Na análise do efeito dominante para as variáveis hidromecânicas, pode observar-se que a velocidade de rotação N é a variável dominante em quatro destas, sendo elas o coeficiente de

fricção f , a evolução do entreferro de/dt , o gradiente de velocidade G e o rendimento energético η . A carga L é dominante para a tensão normal, como é evidente, e para a viscosidade aparente da pasta. O factor N apresenta um coeficiente positivo em todas as variáveis excepto para o entreferro inicial e a tensão normal; aumentos de N provocam assim aumentos da tensão tangencial, do coeficiente de fricção, da taxa de evolução do entreferro, do gradiente de velocidade G , da viscosidade aparente e do rendimento energético. Inversamente, aumentos na velocidade de rotação provocam uma redução do entreferro inicial. O factor L apresenta também sinal positivo para todas as variáveis excepto para o gradiente de velocidade G e para a taxa de evolução do entreferro; aumentos de L têm assim efeitos análogos a N , salvo para a variável G . Os valores máximos da tensão tangencial, do coeficiente de fricção, do entreferro e da sua evolução e do rendimento energético repartem-se entre as condições de refinação com $N=+1$, ou seja A e C . A condição B representa o mínimo da tensão tangencial, do coeficiente de fricção, da taxa de evolução do entreferro e do rendimento energético.

No que respeita às propriedades da pasta e das fibras, N é dominante para o grau de refinação, o WRV , o comprimento da fibra e o teor de macrofibrilas. Este facto parece significar que a velocidade de rotação é para o pinho um factor determinante no controlo do corte da fibra e da sua fibrilação e hidratação. Os respectivos coeficientes são negativos, conduzindo a uma diminuição da geração de finos e da resistência à drenagem com aumentos da velocidade de rotação. A condição de refinação B representa em consequência o máximo do grau de refinação, do tempo de drenagem, do teor de finos, do teor de macrofibrilas, do grau de hidratação e da flexibilidade; representa por outro lado o mínimo comprimento da fibra, e logo o maior efeito de corte, e ainda o mínimo zero-span, o que equivale ao máximo efeito de desgaste na resistência da fibra. O efeito contrário é sentido nas velocidades elevadas de rotação, representado pelas condições de refinação A e C ; estas exibem os valores mínimos do grau de refinação, de tempo de drenagem, do WRV e do teor de macrofibrilas.

Da mesma maneira o factor dominante no grupo de variáveis relativas às propriedades do papel e da ligação é também a velocidade de rotação, sendo o factor de maior influência em seis das dez variáveis em estudo. Este facto significa que, em coerência com a análise das propriedades da pasta e das fibras, a condição de

refinação B representa o máximo para massa volúmica, a área relativa de ligação, a energia de ligação, o índice de tracção (até ao nível de energia específica de refinação E_2) e de rebentamento, e ainda o máximo do coeficiente de absorção; representa por outro lado o mínimo do índice de rasgamento, da brancura, da opacidade e do coeficiente de dispersão da luz. Curiosamente, para o nível máximo de energia específica de refinação, B representa o mínimo do índice de tracção; isto sucede porque neste nível verifica-se em B uma queda brusca do índice de tracção, possivelmente resultado da degradação da qualidade da fibra, hipótese que é sustentada pela ocorrência de um mínimo para o zero-span. Por contraposição, verifica-se que as condições com velocidades elevadas (A e C) representam os mínimos da massa volúmica, do RBA, do índice de tracção (antes da queda em B) e do coeficiente de absorção; por outro lado representam o máximo do índice de rasgamento, de brancura, de opacidade e do coeficiente de dispersão.

Eucalipto

A Tabela 7-3 apresenta as variáveis de análise para o eucalipto. Na análise do efeito dominante para as variáveis hidromecânicas, pode observar-se que a carga L é a variável dominante em sete delas, sendo estas a tensão normal, a tensão tangencial, o coeficiente de fricção f , a evolução do entreferro de/dt , o entreferro inicial e_0 , o gradiente de velocidade G e viscosidade aparente μ_{ap} . O factor L exhibe um coeficiente positivo para a tensão normal e a tensão tangencial, para o gradiente de velocidade e para o rendimento energético; aumentos de L provocam assim aumentos da tensão normal e na tensão tangencial, no gradiente de velocidade e no rendimento energético. Inversamente, aumentos na carga provocam uma redução do coeficiente de fricção, na viscosidade aparente, no entreferro inicial e na sua evolução. Aumentos em N provocam por seu lado aumentos na tensão tangencial, no coeficiente de fricção, no gradiente de velocidade, na evolução do entreferro e no rendimento energético; resulta ainda uma redução da viscosidade aparente. A condição de refinação B representa o valor mínimo da tensão tangencial, do gradiente de velocidade e do rendimento energético, representando o máximo da viscosidade aparente e da evolução do entreferro; C por seu lado representa a máxima tensão tangencial, o máximo gradiente de velocidade e o máximo rendimento energético, mas a menor viscosidade aparente.

Na análise da pasta e das fibras constata-se que a carga L é factor dominante para o teor de finos e para o índice de flexibilidade. Aumentos da carga provocam uma redução da flexibilidade das fibras, embora provoquem um aumento do teor de finos. Por seu lado a velocidade de rotação N é dominante para o tempo de drenagem e o WRV; aumentos de velocidade de rotação geram um menor grau de hidratação. A condição de refinação B representa o máximo do grau de refinação, do tempo de drenagem, do WRV, do zero-span e do índice de flexibilidade; curiosamente também conduz ao mínimo do teor de finos, em contraposição com as varáveis anteriores. A condição de refinação D representa o mínimo do grau de refinação em valores baixos da energia específica de refinação, um mínimo do comprimento e do zero-span, tendo o valor máximo do teor de finos e de macrofibrilas; tem-se assim um maior efeito de corte, de fibrilação e de geração de finos, mas este facto não se reflecte no aumento do grau de refinação, possivelmente pelo facto de a flexibilidade ter um efeito contrário. A condição de refinação C representa por sua vez o mínimo do grau de refinação para maiores energias específicas de refinação, um menor tempo de drenagem e uma menor flexibilidade.

No que concerne às propriedades do papel e da ligação, a velocidade de rotação é dominante para a massa volúmica, o RBA, a energia da ligação, o índice de tracção, a opacidade e o coeficiente de dispersão da luz; maiores valores de N aumentam a opacidade e o coeficiente de dispersão da luz, reduzindo no entanto a massa volúmica, o RBA, a energia de ligação e o índice de tracção. A condição de refinação B representa o máximo da massa volúmica, do RBA, do índice de tracção, do índice de rebentamento e do índice de rasgamento; de forma inversa, representa o mínimo para todas as propriedades ópticas (brancura, opacidade, coeficientes de dispersão e de absorção da luz). A condição de refinação C representa o mínimo da massa volúmica, do RBA, da energia da ligação, do índice de tracção, do índice de rebentamento e do índice de rasgamento; representa ainda o máximo da brancura, dos coeficientes de dispersão e de absorção da luz e ainda da brancura nos níveis mais baixos da energia específica de refinação. O máximo da energia da ligação ocorre para $N=-1$, o que significa que baixas velocidades de rotação poderão representar uma melhor qualidade da ligação.

Bétula

A Tabela 7-4 apresenta as variáveis de análise para a bétula. Na análise do efeito dominante para as variáveis hidromecânicas, pode-se constatar que L é dominante para as tensões normais e tangenciais, para o coeficiente de fricção, para o gradiente de velocidade, para a viscosidade aparente e para o rendimento energético; com a exceção do coeficiente de fricção e da viscosidade aparente, todos estes efeitos têm o sinal positivo. Assim, aumentos na carga conduzem a aumentos nessas variáveis com sinal positivo, e uma redução do coeficiente de fricção e da viscosidade aparente. A condição de refinação B representa o máximo para o coeficiente de fricção, para o entreferro inicial e para a viscosidade aparente; representa ainda o mínimo para o gradiente de velocidade e para o rendimento energético. A condição C representa o mínimo para o coeficiente de fricção, para o entreferro inicial e para a viscosidade aparente. A condição D é o valor máximo da tensão tangencial; a condição A atinge por sua vez o valor mínimo da tensão tangencial e da evolução do entreferro.

No que respeita às propriedades da pasta e das fibras, N é factor dominante do grau de refinação, do tempo de drenagem, do WRV e do teor de macrofibrilas; aumentos na velocidade de rotação conduzem a aumentos no grau de refinação, no tempo de drenagem, no grau de hidratação e no teor de macrofibrilas. L é dominante em relação ao teor de finos, pelo que os aumentos na carga provocam aumentos no teor de finos. Tem-se assim que para $L=+1$ atinge-se o maior nível de teor de finos e para $N=+1$ atinge-se o nível máximo do WRV. A condição de refinação A representa o máximo do grau de refinação, do tempo de drenagem, do índice de flexibilidade e o mínimo do zero-span. A condição B representa o mínimo tempo de drenagem, de teor de finos e de teor em macrofibrilas; atinge ainda o valor máximo do comprimento aritmético e do zero-span, passando no nível mais elevado a representar o menor valor de zero-span. A condição C contém o mínimo do comprimento aritmético da fibra, a mínima flexibilidade e o máximo teor de macrofibrilas. Finalmente a condição D atinge o mínimo grau de refinação e o mínimo WRV.

Para as propriedades do papel e da ligação tem-se que N é dominante em quase todas as propriedades, excluindo-se apenas a energia da ligação, o índice de rasgamento e o índice de absorção. A condição A atinge o máximo da massa

volúmica, do RBA e da energia da ligação, alcançando ainda o nível mais elevado do índice de tracção e de rebentamento; possui também o máximo do coeficiente de absorção e o mínimo das restantes propriedades ópticas (brancura, opacidade e coeficiente de absorção da luz). A condição B representa o mínimo da energia da ligação nos níveis mais baixos de energia específica de refinação e o máximo da opacidade nos níveis mais elevados. A condição D representa o valor mínimo da massa volúmica, do RBA, da energia de ligação acima de E_2 (134,6kWh/t), dos índices de tracção e de rebentamento; de forma contrária, representa o máximo da opacidade e do índice de rasgamento.

PINHO							
Variáveis	Ponto Central	Factor N	Factor L	Factor N×L	Factor Dominante	Máximo	Mínimo
Hidromecânicas							
τ_N	→	0	+	0	L	L=+1	L=-1
τ_T	↑	+	+	-	—	C	B
f	↑	+	+	-	N	A	B
$-\frac{de}{dt}$	→	+	+	+	N	C	B
e_0	—	-	-	+	N×L	C	A
G	↑	+	-	-	N	A	D
μ	↓	+	+	-	L	D	A
η	—	+	+	-	N	C	B
Pasta							
°SR	↑	-	-	+	N	B	C; A
DT	↑	-	-	+	—	B	N=+1
Finos	↑	-	-	+	—	B	C
WRV	↑	-	-	+	N	B	A
L_a	↓	+	0; +	-	N	A; C	B
ZS	↑; Max; ↓	—	—	—	—	A	B
IF	↑; Max; ↓	+	-	+	N×L	B	D
MF	↑; Max; ↓	-	+; -	+	N	B	A
Papel							
ρ	↑	-	-	+	N	B	N=+1
RBA	↑	-	-	+	N	B	A
EL	↑	+; 0	+; -	+	—	C; B	D
IT	↑; →	-; 0	-; +	+; -	—	B; D	C; B
BI	↑; →	-	-	+	—	B	—
IR	↓	+	+	-	N	A	B
BR	↓	+	+	-	N	A	B
OP	↓	+	+	-	N	A	B
S	↓	+	+	-	N	A	B
K	↑	-	-	+	—	B	A

Tabela 7-2 Variáveis de análise do pinho.

EUCALIPTO							
Variáveis	Ponto Central	Factor N	Factor L	Factor N×L	Factor Dominante	Máximo	Mínimo
Hidromecânicas							
τ_N	→	0	+	0	L	L=+1	L=-1
τ_T	↑	+	+	-	L	C	B
f	↑	+	-	-	L	A	L=+1
$-\frac{de}{dt}$	→	+	-	+	L	B	D
e_0	—	0	-	0	L	L=-1	L=+1
G	↑	+	+	+	L	C	B
μ	↓	-	-	+	L	B	C
η	—	+	+	0	—	C	B
Pasta							
°SR	↑	+; -	-	+	—	A; B	D; C
DT	↑	-	-	0; +	N	B	C
Finos	↑	-	+	-	L	D	B
WRV	↑	-	+; -	+	N	B	A
L_a	↓	+	-	-	—	A	D
ZS	↓; →	—	—	—	—	B	D
IF	↑	-	-	-	L	B	C
MF	↑	-	+	+	—	D	A
Papel							
ρ	↑	-	-	+; -	N	B	C
RBA	↑	-	-	+	N	B	C
EL	↑	0; -	+; -	—	N	N=-1	A; C
IT	↑	-	-	+	N	B	C
BI	↑	-	-	+; 0	—	B	C
IR	↑; →	+; 0	-; 0	-; 0	—	A; B	C
BR	↓	+; -	+; -	—	—	C; D; A	B; C
OP	↓	+	+	—	N	C	B
S	↓	+	+	-	N	C	B
K	↑	0; +	0; +	—	—	C	B

Tabela 7-3 Variáveis de análise do eucalipto.

BÉTULA							
Variáveis	Ponto Central	Factor N	Factor L	Factor N×L	Factor Dominante	Máximo	Mínimo
Hidromecânicas							
τ_N	→	0	+	0	L	L=+1	L=-1
τ_T	↑	-	+	-	L	D	A
f	↑	-	-	0	L	B	C
$-\frac{de}{dt}$	↓	-	+	+	N	B	A
e_0	—	-	-	-	—	B	C
G	↑	+	+	+	L	C	B
μ	↓	-	-	-	L	B	C
η	—	+	+	+	L	C	B
Pasta							
°SR	↑	+	-	-	N	A	D
DT	↑	+	+	-	N	A	B
Finos	↑	+	+	-	L	L=+1	B
WRV	↑	+	-	-; +	N	N=+1	D
L_a	↓	-	-	-	—	B	C
ZS	↑; Max; ↓	—	—	—	—	C; B	B; A
IF	↑	-	-	-	—	A	C
MF	↑	+	+	—	N	C	B
Papel							
ρ	↑	+	-	—	N	A	D
RBA	↑	+	-	—	N	A	D
EL	↑	+; 0	+; -	+; 0	—	C; A	B; D
IT	↑	+	-	—	N	A	D
IR	↑; Max; ↓	-	+	-	—	D	C
BI	↑	+	-	—	N	A	D
BR	↓	-	+	—	N	D	A
OP	↓	-	+	+	N	D; B	A
S	↓	-	+	—	N	D	A
K	↑	+	-	-	—	A	D; B

Tabela 7-4 Variáveis de análise da bétula.

7.3. *Optimização conjugada de propriedades*

Uma característica da produção do papel é a necessidade de se conjugarem propriedades que evoluem em sentido contrário ao longo da refinação. Tal é o caso dos pares índice de tracção e índice de rasgamento, do índice de tracção e da opacidade ou da rigidez e do índice de tracção. Faz-se aqui a análise dos gráficos do índice de rasgamento em função da tracção para as três matérias-primas, assente na metodologia de Levlin (1975) para a caracterização de pastas papeleiras.

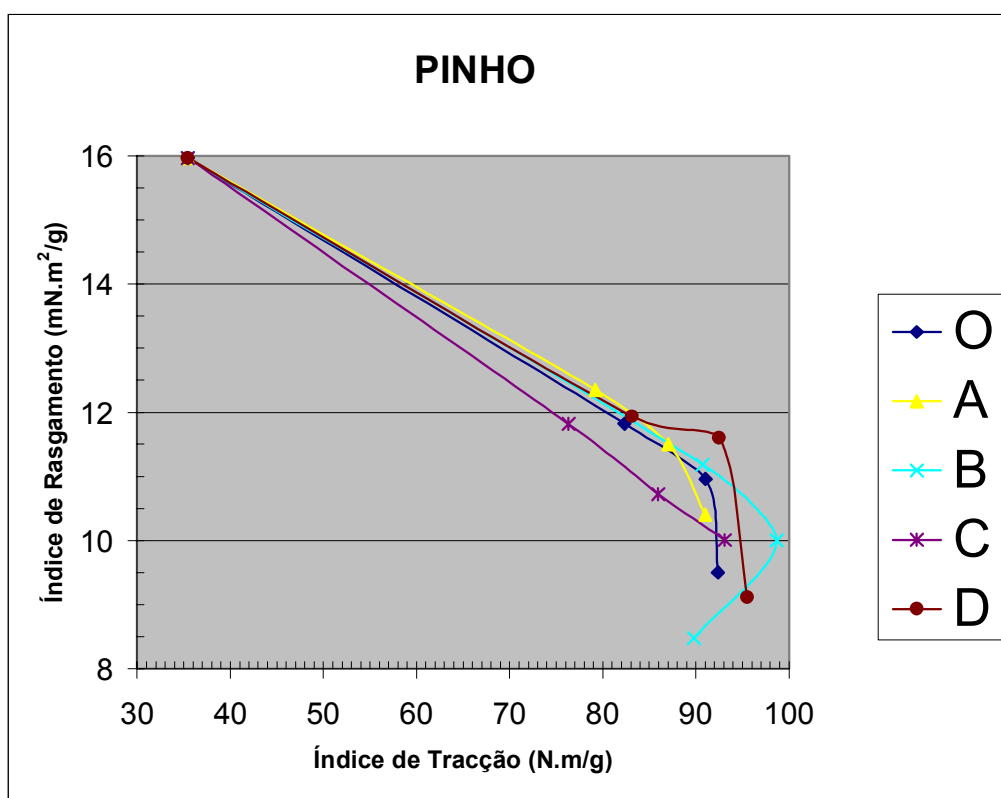


Gráfico 7-1 Relação entre o índice de rasgamento e o índice de tracção do pinho nas diferentes condições de refinação.

O Gráfico 7-1 apresenta a relação entre o índice de rasgamento IR e o índice de tracção IT para o pinho nas diferentes condições de refinação O, A, B, C e D. A condição C constitui a pior relação entre IR e IT, já que possui os valores mais baixos de IR para um dado IT. A condição D apresenta a melhor relação na maior parte da do seu perfil, excepto na zona da condição B próxima do seu máximo. A condição B atinge o valor máximo de IT mas depois tem uma queda, provavelmente devido ao efeito de corte. Observa-se também uma redução da evolução de IT para O, A e D.

Fazendo a ligação com a teoria da carga específica de aresta, parece claro que o SEL muito elevado é prejudicial para o desenvolvimento da resistência, considerando as resistências à tracção e ao rasgamento; é o caso da condição operacional C, com um valor para o SEL de $0,401\text{Jm}^{-1}$, sendo as das outras condições inferiores a $0,320\text{Jm}^{-1}$ (veja-se a equação 3-10, na p.68).

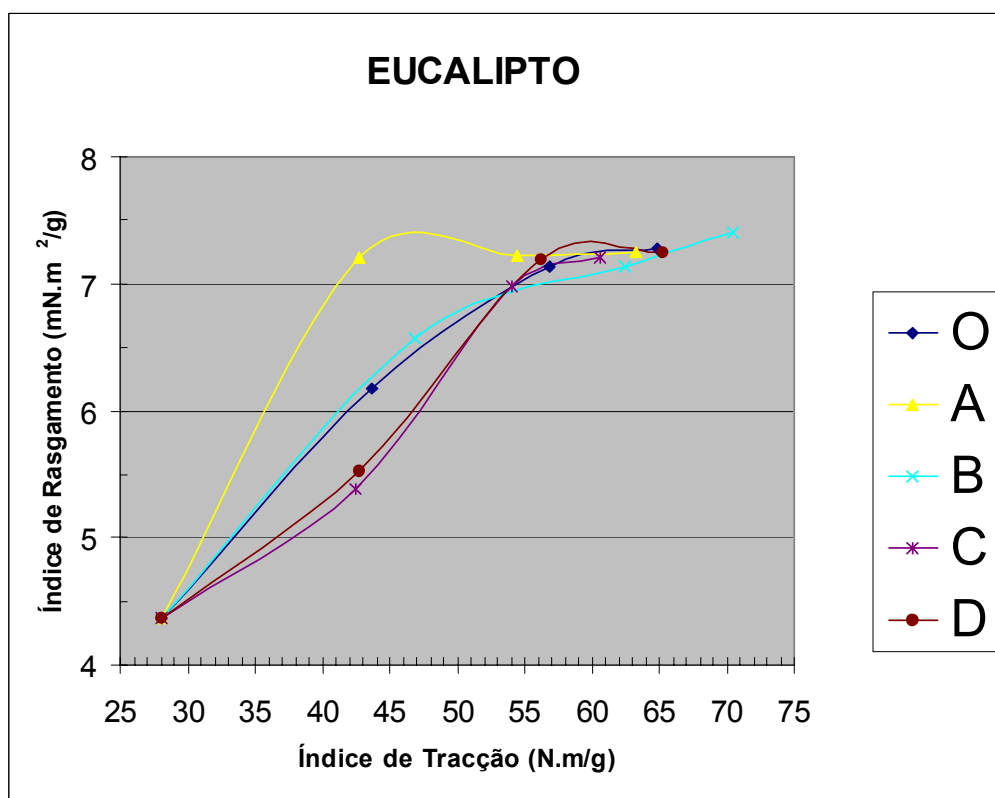


Gráfico 7-2 Relação entre o índice de rasgamento e o índice de tracção do eucalipto nas diferentes condições de refinação.

O Gráfico 7-2 apresenta a relação entre o índice de rasgamento IR e o índice de tracção IT para o eucalipto nas diferentes condições de refinação O, A, B, C e D. A condição A apresenta a melhor relação entre IT e IR. A condição O e a condição A evoluem próximas uma da outra. A condição C e D evoluem também em conjunto, mas representando uma pior evolução que as curvas anteriores. Nos níveis mais elevados de refinação existe uma aproximação das cinco curvas; antes dessa aproximação, tem-se para cada nível de IT que IR cresce na sequência C, D, O, B e A. A condição B é aquela que atinge um maior valor de tracção e de rasgamento. Mais uma vez constata-se que os valores elevados para o SEL são prejudiciais para a evolução conjunta das propriedades de resistência, ou seja a tracção e o rasgamento.

Assim, observa-se que as condições C e D, com valores para o SEL de respectivamente $0,430\text{Jm}^{-1}$ e $0,428\text{Jm}^{-1}$, apresentam os piores desempenhos comparativamente às restantes condições, com valores inferiores a $0,380\text{Jm}^{-1}$ (veja-se a equação 3-12, na p.70).

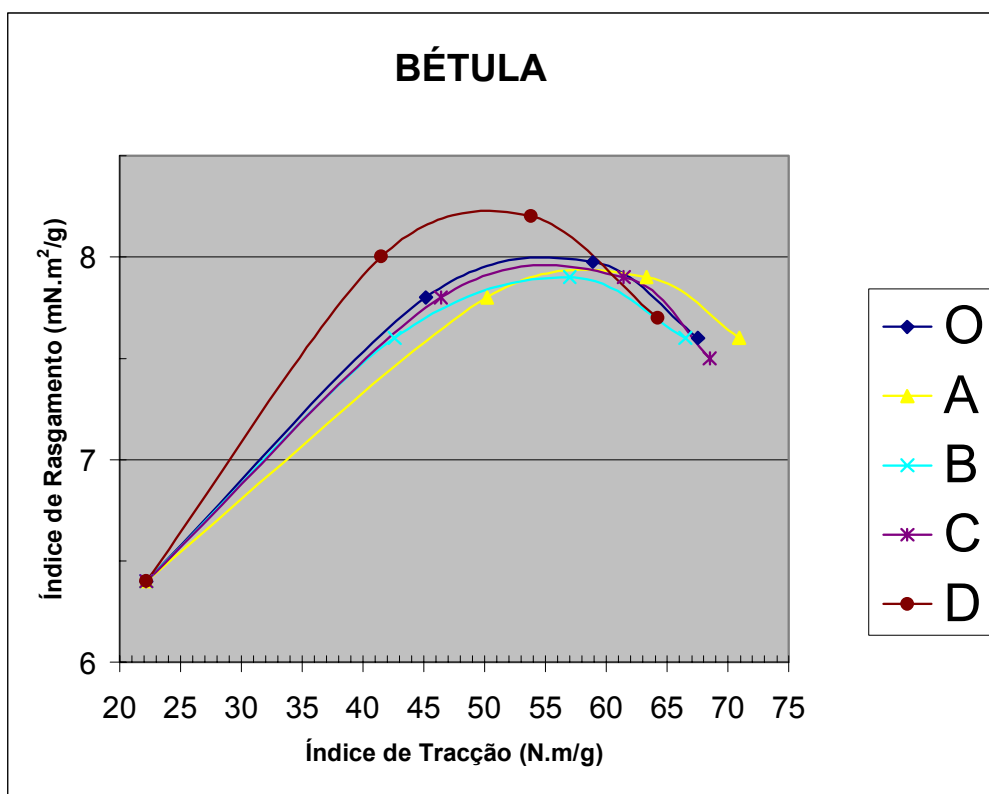


Gráfico 7-3 Relação entre o índice de rasgamento e o índice de tracção da bétula nas diferentes condições de refinação.

O Gráfico 7-3 apresenta a relação entre o índice de rasgamento IR e o índice de tracção IT para a bétula nas diferentes condições de refinação O, A, B, C e D. A condição D apresenta a melhor relação entre IT e IR. As restantes condições evoluem relativamente próximas umas das outras; no entanto a condição A é aquela que consegue atingir o máximo valor do índice de tracção. Contrariamente observado para o pinho e para o eucalipto, constata-se agora que os valores elevados de SEL são favoráveis ao desempenho conjunto da tracção e do rasgamento; verifica-se assim que a condição D, com um SEL de $0,553\text{Jm}^{-1}$, revela um melhor desempenho para índices de tracção inferiores a 55Nm/g , comparativamente às restantes condições, que apresentam valores situados entre $0,395\text{Jm}^{-1}$ e $0,515\text{Jm}^{-1}$ (veja-se a equação 3-14, na p.72).

7.4. Tipos de papel

Neste capítulo realiza-se a selecção de matéria-prima e a optimização das condições operatórias em termos energéticos, tendo em vista a obtenção de diferentes tipos de papel. Os papéis escolhidos compreendem três diferentes tipos: o papel multi-camadas para sacos, o papel de escrita para cadernos e papel de impressão antes da *size-press*. Estes dois últimos exemplos são retirados de Radoslavova (1996, p.217-226), permitindo posteriores comparações. Apresentam-se os respectivos valores padrão das propriedades dos papéis industriais, usando-se a média geométrica das propriedades na direcção máquina e na direcção transversal, para estabelecer os valores objectivo. Estes valores foram ainda incrementados de uma margem de segurança. Nos casos em que havia impossibilidade técnica de se atingir algum valor objectivo, aplicou-se como objectivo o valor máximo alcançado neste trabalho para essa propriedade. Estabeleceram-se dois métodos de optimização: definiu-se como meta um valor objectivo para o índice de rasgamento e obteve-se o valor das outras propriedades; no outro, estabeleceu-se como meta o índice de tracção e obtiveram-se os restantes valores. O critério de selecção foi o da minimização da energia total de refinação consumida ETR (kWh/t). Uma questão interessante é o facto de o mínimo da energia específica de refinação raramente coincidir com o mínimo da energia total aplicada, resultando esse facto das variações nos rendimentos energéticos com as condições operatórias.

7.4.1. Papel multi-camadas para sacos

As propriedades deste papel estão expressas na Tabela 7-5. A matéria-prima escolhida foi o pinho silvestre. Os valores do processo de optimização encontram-se na Tabela 7-6.

Propriedade	Valor Padrão	Valor Objectivo
Índice de Tracção <ul style="list-style-type: none">• Direcção Máquina• Direcção Transversal• Média Geométrica	<ul style="list-style-type: none">• 100 Nm/g• 50 Nm/g• 70,7 Nm/g	77,8 Nm/g (+10%)
Índice de Rasgamento	<ul style="list-style-type: none">• 11 Nm²/kg	12,1 Nm ² /kg (+10%)

Tabela 7-5 Valores padrão e objectivo para o papel multi-camadas para saco.

Meta	Propriedade	O	A	B	C	D
TI	TI (Nm/g)	77,8				
	IR (Nm ² /kg)	12,7	12,7	13,1	11,8	13,2
	EER (kWh/t)	90,6	103,3	65,6	113,9	89,3
	ETR (kWh/t)	566,2	573,9	745,5	522,5	576,1
IR	TI (Nm/g)	83,2	83,5	87,7	75,0	87,0
	IR (Nm ² /kg)	12,1				
	EER (kWh/t)	109,6	127,7	90,9	103,4	121,8
	ETR (kWh/t)	685,0	709,4	1033,0	474,3	785,8

Tabela 7-6 Valores do processo de optimização para o papel multi-camadas para saco.

A condição escolhida foi a C, com uma energia específica de refinação de 113,9kWh/t, sendo a energia total consumida 522,5kWh/t; tem-se um IR de 11,8 Nm²/kg e um TI de 77,8 Nm/g.

7.4.2. Papel de escrita (caderno)

As propriedades deste papel estão expressas na Tabela 7-7. A matéria-prima escolhida foi o eucalipto. Os valores do processo de optimização encontram-se na Tabela 7-8.

Propriedade	Valor Padrão	Valor Objectivo
Índice de Tracção <ul style="list-style-type: none"> • Direcção Máquina • Direcção Transversal • Média Geométrica 	<ul style="list-style-type: none"> • 40,0 Nm/g • 19,8 Nm/g • 28,1 Nm/g 	35,1 Nm/g (+25%)
Índice de Rasgamento	<ul style="list-style-type: none"> • 11,0 Nm²/kg 	7,1 Nm ² /kg (limite possível)
Opacidade	84,9 %	—
Brancura	80,7 %	—

Tabela 7-7 Valores padrão e objectivo para o papel de escrita para caderno.

Meta	Propriedade	O	A	B	C	D
TI	TI (Nm/g)	35,1				
	IR (Nm ² /kg)	5,4	5,9	5,3	5,1	5,2
	Opacidade (%)	78,7	77,0	77,4	78,0	78,0
	Brancura (%)	88,4	88,7	88,3	88,8	88,6
	EER (kWh/t)	32,9	37,2	26,9	34,4	35,0
	ETR (kWh/t)	149,6	170,6	155,3	129,3	157,5
IR	TI (Nm/g)	54,2	41,0	78,8	57,0	58,1
	IR (Nm ² /kg)	7,1				
	Opacidade (%)	76,6	77,6	71,0	77,0	76,0
	Brancura (%)	86,4	88,5	85,7	86,4	86,6
	EER (kWh/t)	129,2	69,8	243,4	164,5	153,4
	ETR (kWh/t)	587,8	320,1	1406,7	618,5	690,9

Tabela 7-8 Valores do processo de otimização para o papel de escrita para caderno.

A condição escolhida foi a A, com uma energia específica de refinação de 69,8kWh/t, sendo a energia total consumida 320,1kWh/t; tem-se um IR de 7,1Nm²/kg e um TI de 41,0 Nm/g. A sua opacidade é de 77,6% e a brancura 88,5%. Para se atingirem as exigências ao nível do rasgamento seria necessário incorporar fibra longa. Desta forma seria possível refinar menos e assim apresentar uma opacidade a níveis mais próximos do objectivo.

7.4.3. Papel de impressão antes da *size-press*

As propriedades deste papel estão expressas na Tabela 7-9. A matéria-prima escolhida foi a bétula. Os valores do processo de otimização encontram-se na Tabela 7-10.

A condição escolhida foi a D, com uma energia específica de refinação de 68,0kWh/t, sendo a energia total consumida 238,7kWh/t; tem-se um IR de 8,0Nm²/kg e um TI de 39,1 Nm/g. A sua opacidade é de 72,6% e a brancura 84,6%.

Mais uma vez não se atinge o valor desejado para o rasgamento. Assim, para se atingir as exigências ao nível do rasgamento seria necessário incorporar fibra longa; o valor da energia de refinação seria então inferior, podendo-se também obter uma maior opacidade.

Propriedade	Valor Padrão	Valor Objectivo
Índice de Tracção <ul style="list-style-type: none"> Direcção Máquina Direcção Transversal Média Geométrica 	<ul style="list-style-type: none"> 48,1 Nm/g 22,5 Nm/g 32,9 Nm/g 	36,2 Nm/g (+25%)
Índice de Rasgamento	<ul style="list-style-type: none"> 11,3 Nm²/kg 	8,0 Nm ² /kg (limite possível)
Opacidade	84,9	—
Brancura	80,7	—

Tabela 7-9 Valores padrão e objectivo para o papel de impressão.

Meta	Propriedade	O	A	B	C	D
TI	TI (Nm/g)	41,1				
	IR (Nm ² /kg)	7,8	7,6	7,7	7,7	8,1
	Opacidade (%)	73,5	76,0	72,9	74,7	72,7
	Brancura (%)	84,9	84,1	84,9	84,9	84,6
	EER (kWh/t)	62,9	51,1	69,8	58,4	76,5
	ETR (kWh/t)	229,3	195,2	299,5	184,3	268,5
IR	TI (Nm/g)	63,4	53,5	55,1	50	39,1
	IR (Nm ² /kg)	8,0				
	Opacidade (%)	69,0	72,5	71,7	73,2	72,6
	Brancura (%)	83,4	84,0	84,1	84,4	84,6
	EER (kWh/t)	162	93,6	128,2	91,7	68,0
	ETR (kWh/t)	590,6	357,4	550,0	289,4	238,7

Tabela 7-10 Valores do processo de optimização para o papel de impressão.

7.5. Conclusões da avaliação do potencial das pastas papeleiras

Podem-se extrair as seguintes conclusões básicas sobre a avaliação do potencial de pastas papeleiras:

1. É exequível efectuar-se uma análise comparativa entre diferentes pastas em relação às variáveis hidromecânicas, às propriedades das pastas e das fibras e às propriedades do papel e das ligações. Pode-se comparar, desta forma, o comportamento hidromecânico do refinador Valley para cada matéria-prima e o respectivo rendimento energético.

Consegue-se igualmente comparar as propriedades das pastas, das fibras correspondentes e das ligações, de forma a tomar a decisão mais adequada no que concerne às propriedades do papel requeridas e à minimização do consumo energético.

2. Seleccionada a pasta mais adequada para os objectivos pretendidos, as fórmulas anteriormente obtidas relacionando as propriedades da pasta, das fibras, da ligação e do papel com a energia específica de refinação e as condições de operação do refinador N e L, é realizável a procura das condições de operação que conduzem ao menor consumo energético ou permitem a melhoria da combinação de propriedades desejadas.
3. A análise anterior permite igualmente relacionar as diferentes variáveis e propriedades, o que leva à obtenção de uma visão global de todo o processo e à inter-relação de variáveis e propriedades.
4. Os gráficos de combinação binária de propriedades (tais como os que relacionam o índice de tracção e índice de rasgamento, ou o índice de tracção e a opacidade ou finalmente a rigidez e o índice de tracção) são um auxiliar importante num processo de obtenção das propriedades pretendidas. Foi possível concluir que os valores elevados de carga específica de aresta são prejudiciais para a evolução conjunta dos índices de tracção e de rasgamento nos casos do pinho e do eucalipto, sendo por seu lado favoráveis no caso da bétula.
5. Em relação às matérias-primas estudadas, o pinho é aquela que permite responder à necessidade de propriedades de resistência, se bem que as suas propriedades ópticas sejam as menos desejáveis. Por seu lado, a bétula e o eucalipto conseguem satisfazer as necessidades ópticas à custa de piores características de resistência. Comparando estas duas últimas pastas, pode-se afirmar que a bétula apresenta melhores propriedades mecânicas, mas o eucalipto supera-a do ponto de vista de propriedades ópticas. Constata-se igualmente que os consumos energéticos para o eucalipto são superiores comparativamente à bétula.

6. O sucesso na pesquisa de um ponto óptimo depende em grande parte da matéria-prima escolhida, sejam estas fibras curtas, sejam fibras longas ou sejam estas utilizadas em mistura. É possível numa certa medida atingir-se um objectivo para as propriedades ópticas recorrendo a branqueadores ópticos ou pelo emprego limitado de cargas ou ainda por uma ligeira cobertura na *size-press*. Tendo em conta os valores do rendimento energético da refinação, que são diferentes para as diversas pastas, pode-se concluir que a escolha da matéria-prima é um elemento essencial na optimização da refinação com o propósito de obter um papel com as propriedades requeridas. Nos casos em que a optimização se depara com restrições inultrapassáveis com apenas um tipo de pasta, recorre-se então à mistura de pastas.

Conclusão e Perspectivas Futuras

Partindo-se de um refinador laboratorial Valley standard, bem conhecido dos técnicos papeleiros e que deu as suas provas durante décadas, procurou-se adaptar este equipamento de forma a constituir uma ferramenta de avaliação da refinabilidade de pastas para papel. Na realidade, a diversidade de materiais fibrosos utilizados hoje em dia para a fabricação de papel, a madeira de resinosas, a madeira de folhosas e plantas anuais, assim como os progressos ocorridos nos equipamentos industriais aumentam a necessidade de uma melhor monitorização do potencial papeleiro das pastas, bem como a análise do seu comportamento na refinação em função das acções mecânicas a que é sujeita no refinador.

Foi neste âmbito que se equipou o refinador Valley standard de instrumentação para a medição do entreferro entre o rotor e o estator, da potência consumida, de um variador de velocidade do rotor e se adquiriu a possibilidade de variar a carga exercida. A precisão encontrada para as medidas foi satisfatória, atendendo ao facto de se tratar de um equipamento com uma capacidade de 360 gramas de pasta operando a baixa consistência.

Pode-se dizer ainda que a instalação da instrumentação utilizada permitiu um melhor controlo do estado de funcionamento do refinador nas condições standard. Por exemplo, a instrumentação de medida do valor do entreferro permite o controlo do desgaste das lâminas do refinador, que precisa de uma calibração para conservar as suas características. Desta maneira foi possível monitorar os parâmetros de acção mecânica do refinador para diferentes condições operatórias: a velocidade de rotação (N) e a carga (L).

Através da execução de um plano de experiência em torno das condições normalizadas para o refinador Valley por variação de N e L, deduziram-se relações entre os parâmetros hidrodinâmicos da refinação e os parâmetros de acção mecânica no refinador, para as três pastas papeleiras: o pinho, o eucalipto e a bétula. Os estudos permitiram avaliar as acções da máquina sobre a pasta em termos de forças exercidas, do coeficiente de fricção, do gradiente de velocidade, da absorção da energia útil e do rendimento energético da operação. Os valores dos rendimentos energéticos do refinador Valley observados foram comparáveis a equipamentos como o refinador

Voith com uma capacidade de 1kg. O estudo permitiu ainda definir o comportamento reológico da suspensão de pasta de papel em circulação no entreferro para condições hidrodinâmicas bastante diversas. Por exemplo, foi possível constatar o comportamento reofluidificante da suspensão de pasta e verificar que a sua viscosidade aparente decresce ao longo da refinação.

Em relação à análise do efeito preponderante sobre as variáveis hidromecânicas, observou-se que a velocidade de rotação N é o factor mais influente no caso do pinho, sendo a carga L o factor mais importante sobre aquelas para a bétula e o eucalipto. Tal facto dever-se-á ao seu reduzido entreferro, em que variações na carga significam um efeito importante nas tensões exercidas e no coeficiente fricção observados.

Os dados experimentais sugerem ainda que o aumento do entreferro e da viscosidade aparente conduzem a uma pior transferência de energia do refinador para a pasta, o que reduz o rendimento energético do equipamento. Deste ponto de vista, a menor viscosidade das pastas de folhosas face às resinosas leva a que estas últimas tenham um desenvolvimento menos rápido das propriedades que as primeiras durante a refinação.

Dado o elevado número de variáveis, é através da análise das expressões polinomiais multi-variáveis representadas graficamente que é possível investigar as tendências de evolução das características da pasta e do papel. A análise dos resultados experimentais centrou-se em dois níveis: (i) Análise do comportamento médio das diferentes matérias-primas como função da energia específica da refinação, utilizando os dados do ponto central, i.e. as condições padrão de refinação. (ii) Análise para cada matéria-prima dos efeitos das variáveis operatórias do refinador, i.e. a velocidade de rotação N e a carga L , em cada nível de energia específica de refinação.

Para caracterizar as propriedades da pasta durante a refinação realizaram-se as medidas padrão: o grau de refinação SR, o tempo de drenagem TAPPI e o grau de hidratação WRV, assim como as características morfológicas da fibra medidas pelo equipamento de análise de imagem MORFI, a flexibilidade medida pelo aparelho CYBERFLEX e a sua resistência à ruptura em estado húmido medida com o aparelho Zero-Span da PULMAC. Foi possível relacionar estas propriedades com as condições

de operação e a energia específica de refinação. O pinho apresentou os maiores valores para o WRV, o *zero-span*, a flexibilidade, o comprimento aritmético da fibra e o teor em macrofibrilas; este último factor reduziu-se para energias de refinação elevadas provavelmente pela libertação das macrofibrilas. Esta pasta apresentou ainda o menor teor em finos, possivelmente pela menor proporção do material perdido em finos em relação à massa total. O eucalipto apresentou por sua vez o maior teor em finos e os menores valores para o WRV, o comprimento aritmético das fibras e o teor em macrofibrilas. A bétula apresentou os menores valores para o *zero-span* e ainda para a flexibilidade acima do nível da energia específica de refinação E_2 ; apresentou ainda valores de WRV próximos do eucalipto. A evolução do grau de refinação SR com a energia específica de refinação foi análoga para as três pastas, no entanto com diferentes pontos de inflexão e tempos de refinação muito diversos. Por sua vez, em relação ao tempo de drenagem, os pontos de inflexão encontravam-se próximos entre si. Os efeitos das variáveis N e L são muito significativos, permitindo obter suspensões com características muito diferentes com a mesma energia específica de refinação. No entanto, o pinho apresenta como factor preponderante sobre as propriedades das fibras e da pasta a velocidade de rotação N, ao passo que L parece ser mais influente para o eucalipto.

Tal como as propriedades da pasta e das fibras, tornou-se viável estabelecerem-se equações globais para cada matéria-prima relacionando cada propriedade do papel e das ligações com a energia específica de refinação e com as propriedades operacionais do refinador Valley. Para cada matéria-prima obtiveram-se relações para a massa volúmica, o índice de tracção, o índice de rebentamento, o índice de rasgamento, as propriedades ópticas, designadamente a brancura, a opacidade e os coeficientes de dispersão e absorção da luz e ainda as propriedades da ligação, especificamente a área relativa de ligação e a energia de ligação.

Na análise comparativa das diferentes pastas no seu ponto central o pinho exhibe em cada nível da energia específica da refinação os valores mais elevados para a área relativa da ligação, a energia da ligação Nordman e em consequência para os índices de tracção, de rebentamento e de rasgamento. Por sua vez, apresenta valores mínimos para o coeficiente de dispersão da luz, a opacidade e a brancura. O eucalipto ostenta em termos comparativos os maiores valores em cada nível de energia

específica de refinação para o coeficiente de dispersão da luz, a opacidade e a brancura. Inversamente, apresenta os menores valores para a massa volúmica, a área relativa de ligação e para os índices de tracção, de rebentamento e rasgamento. A bétula manifesta, quando comparada com as outras matérias-primas para a mesma energia específica de refinação, o valor máximo da massa volúmica e o mínimo para a energia de ligação Nordman. À semelhança do verificado para as propriedades da suspensão e das fibras, as variáveis de operação do refinador N e L têm efeitos muito significativos nas características do papel. No entanto, as três matérias-primas exibem como factor preponderante para diversas propriedades do papel a velocidade de rotação N.

Os efeitos das variáveis do refinador N e L para um dado nível de energia sobre as propriedades da suspensão e do papel evidenciam as potencialidades do refinador Valley, desde que devidamente adaptado, para a avaliação do potencial papelero das pastas, já que permite refinar em condições diversas.

Verifica-se particularmente a ocorrência de comportamentos inversos entre a bétula, por um lado, e o pinho e o eucalipto, por outro, face às variáveis operatórias N e L do refinador. Este é um facto relevante para a condução da refinação de pastas destinadas a serem misturadas na composição do papel: seria um erro refinar estas pastas em mistura.

A refinação é uma operação intensiva em energia, e por isso a sua optimização deve ter em conta o consumo específico de energia. O problema é complexo, já que são frequentemente acções opostas que optimizam cada uma das principais propriedades do papel. Por outro lado, o rendimento energético do refinador depende do tipo de pasta. A metodologia experimental utilizada neste estudo permitiu comparar os consumos energéticos específicos requeridos para obter determinadas características do papel.

Os resultados permitem ainda seleccionar a pasta mais adequada à produção de papel com determinados requisitos. As expressões matemáticas obtidas, relacionando as propriedades da pasta, das fibras, da ligação e do papel com a energia específica de refinação e as condições de operação do refinador N e L, permitem a procura das condições de operação que conduzem ao menor consumo energético ou à melhoria da combinação de propriedades desejadas. A análise anterior permitiu

igualmente relacionar as diferentes variáveis e propriedades, o que leva à obtenção de uma visão global de todo o processo e à inter-relação de variáveis e propriedades.

Os gráficos de combinação binária de propriedades, que são um auxiliar importante num processo de obtenção das propriedades pretendidas, mostraram a importância das condições de refinação. Para o pinho, as condições de refinação com N e L elevados é aquela que conduz à pior performance mecânica, enquanto as restantes são equivalentes (até um índice de tracção de 90Nm/g). A condição com N e L baixos é a que permite atingir um maior valor do índice de tracção. A inclusão do rendimento energético introduz, por sua vez, alguma complexidade na análise. Para o eucalipto, constata-se que para índices de tracção inferiores a 55Nm/g a combinação de velocidade elevada e carga reduzida conduz à melhor performance mecânica, sendo a pior apresentada pelas condições com carga mais elevada. Finalmente, para o caso da bétula presencia-se o melhor desempenho para carga elevada e velocidade reduzida para índices de tracção inferiores a 60Nm/g.

Em relação às matérias-primas estudadas, o pinho é aquela que melhor permite responder à necessidade de propriedades de resistência, se bem que as suas propriedades ópticas sejam as menos desejáveis. Por seu lado, a bétula e o eucalipto conseguem satisfazer as necessidades ópticas à custa de piores características de resistência. Comparando estas duas últimas pastas, pode-se afirmar que a bétula apresenta melhores propriedades mecânicas, mas o eucalipto supera-a do ponto de vista de propriedades ópticas.

Em termos de perspectivas futuras deste trabalho, destacam-se os seguintes caminhos:

- Aprofundar o conhecimento fundamental da operação de refinação, precisando a influência dos processos hidrodinâmicos sobre as propriedades físico-químicas e morfológicas das fibras, a sua hidratação, o seu estado de superfície e a sua influência sobre o grau de ligação inter-fibras. Numa primeira fase dever-se-á procurar encontrar uma relação entre a tensão tangencial (ou a viscosidade aparente da pasta), o gradiente de velocidade no entreferro e as propriedades morfológicas das fibras e mesmo dos flocos. Posteriormente procurar-se-á estabelecer relações entre a evolução das propriedades estudadas

nesta tese (das fibras, da pasta, das ligações e do papel) com as tensões normal e tangencial aplicadas e naturalmente a energia específica de refinação aplicada.

- Implementar e melhorar as metodologias desenvolvidas e aplicar métodos mais sofisticados de optimização.
- Melhorar a metrologia das medidas de energia e das próprias forças envolvidas. Um possível progresso seria a instalação no veio do rotor de uma coleira com um medidor de binário, de forma a permitir a medição directa da força tangencial aplicada pelo rotor.
- Medição em contínuo das propriedades morfológicas das fibras, através da amostragem automática periódica de pasta recolhida no refinador.
- Aplicar esta metodologia para a avaliação de pastas e das suas condições num refinador piloto.

Bibliografia

- ALEXANDER, S.D.; MARTON, R.; MCGOVERN, S.D. - **Effect Of Beating And Wet Pressing On Fiber And Sheet Properties I I. Sheet Properties.** TAPPI, Vol. 51, N. 6, June 1968, p.282-288.
- ALEXANDER, S. D.; MARTON, R.; MCGOVERN, S. D. - **Effect Of Beating And Wet Pressing On Fiber And Sheet Properties I. Individual Fiber Properties.** TAPPI, Vol. 51, N. 6, June 1968, pg. 277-282.
- AQUAIONIC – **Aqualonic maintenance and user’s manual.** Florence, SIATA, 1998. MAN0015, Rev. A.
- ASUNMAA, S.K. - **The Delamination Of Fiber Walls By Beating And Refining.** TAPPI, Vol. 49, N. 7, July 1966, p. 319-324.
- ATAK, D. - **Advances in Beating and Refining.** Symposium on Fibre-Water Interactions in Paper-Making, Oxford. Vol. I . ISBN 0-900219-04-1. 1978, p.261-297.
- BATCHELOR, W. J. - **Effects of Flocculation and Floc Trapping on Fibre Treatment in Low-Consistency Refining.** Journal of Pulp and Paper Science: Vol.27 N. 7 July 2001.
- BATCHELOR, W. J.; KURE, K. A.; OUELLET, D. - **Refining And The Development Of Fibre Properties.** Nordic Pulp and Paper Research journal, Vol. 14, N. 4, 1999, p. 285- 291.
- BATCHELOR, W. J.; OUELLET, D. – **Estimating forces on Fibres in Refining.** PGRLR 68, Post-Graduate Research Laboratory Report, Paprican, October 1997, p. 1- 15.
- BATCHELOR, W. J.; OUELLET, D. – **Estimating forces on Fibres in Refining.** United Kingdom, Pira. 4th International Refining Conference, Fiuggi, Italy. 18-20 March. 1997.
- BIERMANN, C.J. – **Essentials of Pulping and Papermaking.** San Diego, Academic Press. 1993.
- BOX, G. E.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. – **Statistics for Experimenters: An introduction to design, data analysis and model building.** John Wiley & Sons, 1978.

- BRECHT, W. - **A Method For The Comparative Evaluation Of Bar-Equipped Beating Devices.** TAPPI, Vol. 50, N. 8, August 1967, p. 40A-44A.
- CASEY, J. P. (EDITOR) – **Pulp and Paper – Chemistry and Chemical Technology.** Third Edition, Volume II. New York, Wiley & Sons. 1980. ISBN 0-471-03176-3.
- CAUCAL, G. ; CHAUSSY, D. ; RENAUD, M. - **Etude Physique Et Hydraulique Du Raffinage II.** Revue A.T.I.P., Vol. 46, N. 5 Septembre 1992, p. 130-137.
- CAUCAL, G., CHAUSSY, D. ; RENAUD, M. - **Etude Physique Et Hydraulique Du Raffinage III.** Revue A.T.I.P., Vol. 46, N. 7 Décembre 1991, p. 194-199.
- CAUCAL, G., CHAUSSY, D. ; RENAUD, M. - **Etude Physique Et Hydraulique Du Raffinage.** Revue A.T.I.P., Vol. 45, N. 5 Août Septembre 1991, p. 187-199.
- CAUCAL, G., CHAUSSY, D. ; RENAUD, M.- **Etude Physique Et Hydraulique Du Raffinage IV.** Revue A.T.I.P., Vol. 49, N. 4 août-septembre 1991, p. 114-121.
- CHARUEL, R. ; ROUX, J. C. ; AGOSTINI, F. ; ROUSSELLE M.C. - **Influence De La Geometrie Des Lames Sur Le Raffinage Des Pâtes Chimiques.** Revue A.T.I.P., Vol. 42, n° 4, Avril 1988, p. 153-160.
- CLARK, J. D'A - **Fibrillation, Free Water, And Fiber Bonding.** TAPPI, Vol. 52, N. 2, February 1969, p. 335-339.
- CLARK, J. D'A. – **Pulp Technology and Treatment for Paper.** 2nd Edition. San Francisco, Miller Freeman Publications. 1985.
- COWAN, W.F. – **Fiber Quality Testing Theory & Practice.** PULMAC.March 1991.
- EBELING, K. - **A Critical Review of Current Theories for the Refining of Chemical Pulps.** International Symposium on Fundamental Concepts of Refining, Appleton: 1980 p. 1- 36
- EL-SHARKAWY, K.; LIIAS, P.; PAULAPURO, H. – **Factor Analysis as a Tool to Control Chemical Pulp Quality in Refining.** Finland, Progress in Paper Physics Seminar. 2004.
- EMERTON, H. W. – **The Preparation of Pulp Fibres for Papermaking.** In The Raw Materials and Processing of Papermaking. Handbook of Paper Science 1. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1980, p. 139 – 164. ISBN 0-444-41778-8.
- ESPÍRITO SANTO, – **Instrumentação Digital para Medida e Processamento de Grandezas Eléctricas.** Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2001.

- FOX, T.S. - **Inside a Disk Refiner**. International Symposium on the Fundamentals Concepts of Refining, Appleton: 1980 p. 281-313.
- FOX, T.S.; BRODKEY, R.S.; NISSAN, A.H. - **High-Speed Photography Of Stock Transport In A Disk Refiner**. TAPPI, Vol. 62, N. 3, March 1979, p. 55-58.
- GABL, H. – **Papillon™, a New Refining Concept**. Das Papier, pw 2/2004, p. 43-50.
- GUIMARÃES, R. C. – **Estatística**. Lisboa, McGraw-Hill, 1997. ISBN: 972-8298-45-5.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. – **Fundamentals of Physics, Extended**. New York, John Wiley & Sons, 1997. ISBN: 0-471-10559-7.
- HÄRKÖNEN, E.; HUUSARI, E.; RAVILA, P. - **Residence Time Of Fibre In A Single Disk Refiner**. Pulp & Paper Canada, 101:11 (2000), p. 45-50.
- HELLE, T. – **Technical Refining of Chemical Pulps**. Curso de Produção de Papel. Universidade de Aveiro, 1989.
- HERBERT, W; MARSH, P.G. - **Mechanics And Fluid Dynamics Of A Disk Refiner**. TAPPI, Vol. 51, N. 5, May 1968, p. 235-239.
- HILTUNEN, E. – Papermaking Properties of Pulp. In LEVLIN, J.; SÖDERHJELM, L. (EDITORS). –**Pulp and Paper Testing**. Papermaking Science and Technology (Book 17), Fapet Oy, Helsinki, 1999.
- HOLMAN, J. P. – **Experimental Methods for Engineers**. Sixth edition, McGraw-Hill Inc., 1994. ISBN 0-07-113345-3.
- JACQUELIN, G. – **L'Effect de Friction au Cours du Raffinage : nouveau type d'appareil**. EUCEPA – TAPPI. Venezia, 15-18 Sept. 1964, p. 77-87.
- JOHNSON, J. A.; BENNET, K. A.; MONTEREY, H. M. Failure Phenomena. In MARK, R.E. – **Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard**. New York, Volume 1, 1983. ISBN: 0 – 8247 – 1871 – 2.
- JORIS, D. - **Théorie Mathématique Du Raffinage De La Pâte A Papier En Basse Concentration**. Revue A.T.I.P., Vol. 40, N. 10 1986, p. 507-526.
- KAJANTO, I.; LAAMANEN, J.; KAINULAINEN, M. – Paper Bulk and Surface. In NISKANEN, K. – **Paper Physics**. Papermaking Science and Technology (Book 16), Fapet Oy, Helsinki, 1998.

- KAO, D.T.Y. – Rheology of Suspensions. Chapter 33. In CHERMISINOFF, N.P.; GUPTA, R: - **Handbook of Fluids in Motion**. Ann Arbor Science, p. 863-893. 1983. ISBN 0-250-40458-3.
- KEREKES, R. J.; CLARA, M.; DHARNI, S.; MARTINEZ M. - **Application of the C-Factor to Characterize Pulp Refiners**. Journal of Pulp and Paper Science: Vol.19 N. 3 May 1993.
- KEREKES, R. J.; OUELLET, D.; MARTINEZ M. - **New Perspectives On Refining Intensity**. Miscellaneous Report MR 329, April 1996, Pulp and Paper Research Institute of Canada and Department of Chemical Engineering Pulp and Paper Centre Of The University of British Columbia Vancouver, Canada.
- KIBBLEWHITE, R. P. - **Structural Modifications To Pulp Fibers: Definitions And Role In Papermaking**. Structural Modifications To Pulp Fibers: Definitions And Role In Papermaking
- KLINE, J.E - **Paper and Paperboard, Manufacturing and Converting Fundamentals**. San Francisco, Pulp & Paper Book. 1992. ISBN: 0- 87930-134-1.
- KOCH, V.; ANDREELLO, M. – **Use of Defloculants in Refining of Pulp Fibres**. PIRA International Contract JOU2-CT-92-0051, Third periodic report CEC, Leatherhead, Surrey, 1994.
- KORTSCHOT, M. T. - **The Role Of The Fibre In The Structural Hierarchy Of Paper**. Transactions of the 11th Fundamental Research Symposium on Paper-Making Materials, Cambridge, p.351-399.
- LAVIGNE, J. R. – **An Introduction to Paper Industry Instrumentation**. Miller Freeman Public., San Francisco, 1977.
- LAVIGNE, J. R. – **Pulp and Paper Dictionary**. Miller Freeman Publications, San Francisco, 1986.
- LEIDER, P. J.; NISSAN, A. H. - **Understanding The Disk Refine: .The Mechanical Treatment Of Fibers**. TAPPI, Vol. 60, N. 10, October 1977, pg. 85-89.
- LEIDER, P. J.; RIHS, J. - **Understanding The Disk Refiner: I. The Hydraulic Behaviour**. TAPPI, Vol. 60, N. 9, September 1977, pg. 98-102.
- LESKELA, M. – Optical Properties, Chapter 4. In NISKANEN, K. (EDITOR) – **Paper Physics**. Papermaking Science and Technology (Book 16), Fapet Oy, Helsinki, 1998.

- LEVLIN, J. – **Characterization of Papermaking Pulps**. TAPPI, Vol. 58, N. 1, January 1975, p. 71-74.
- LEVLIN, J.; SÖDERHJELM, L. (EDITORS). – **Pulp and Paper Testing**. Papermaking Science and Technology (Book 17), Fapet Oy, Helsinki, 1999.
- LEVLIN, J., - Aim of Pulp and Paper Testing, Chapter 1. In LEVLIN, J.; SÖDERHJELM, L. (EDITORS). – **Pulp and Paper Testing**. Papermaking Science and Technology (Book 17), Fapet Oy, Helsinki, 1999.
- LEVLIN, J., - General Physical Properties of Paper and Board, Chapter 7. In LEVLIN, J.; SÖDERHJELM, L. (EDITORS). – **Pulp and Paper Testing**. Papermaking Science and Technology (Book 17), Fapet Oy, Helsinki, 1999.
- LEVLIN, J.E.; NORDMAN, L. – **Material Losses During Defibration and Beating of High-Yield Pulps**. In Fibre-Water Interactions in Papermaking. Trans. Of the Symposium held at Oxford, Sept. 1977. Volume I. p. 299-304. London, Fund. Res. Comm., Brit. Paper and Board Ind. Fed., 1978.
- LORENTZEN & WETTRE - **Valley Beater Operating Instructions**. Stockholm, 1985.
- LUMIAINEN, J. - **New Theory Can Improve Practice**. PPI, August 1990, p. 46-47.
- LUMIAINEN, J. – **O novo conceito de refinador cónico e a nova teoria da carga específica de superfície**. In Pasta e Papel, Abril 1995, p. 23-29.
- LUMIAINEN, J. – Refining of Chemical Pulps. IN PAULAPURO, H. (EDITOR) – **Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End (Chapter 4)**. Papermaking Science and Technology (Book 8), Fapet Oy, Helsinki, 2000. ISBN 952-5216-00-4.
- LUNER, P. – **Wet Fiber Flexibility as an Index of Pulp and Paper Properties**. PIRA International Conference on “Advances in Refining Technologies”, Birmingham, United Kingdom, Vol.1, Session 1, Paper 3. 1986.
- MARK, R. E.; GILLIS, P. P. – Mechanical Properties of Fibers. In MARK, R.E. – **Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard**. New York, Volume 1, 1983. ISBN: 0 – 8247 – 1871 – 2.
- MARK, R.E. – **Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard**. New York, Volume 1, 1983. ISBN: 0 – 8247 – 1871 – 2.
- MARK, R.E. – **Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard**. New York, Volume 2, 1984. ISBN: 0 – 8247 – 7052 – 8.

- MARTINEZ, D. M.; BATCHELOR, W.J.; KEREKES, R. J.; OUELLET, D. - **Forces On Fibres In Low-Consistency Refining: Normal Force**. Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 21 N. 1 January 1997, p. J11 – J18.
- MARTINEZ, D. M.; BATCHELOR, W.J.; KEREKES, R. J.; OUELLET, D. - **Forces On Fibres In Low-Consistency Refining: Shear Force**. Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 21 N. 1 January 1997, p. J40- J45.
- MARTINEZ, D. M.; KEREKES, R. J. - **Forces On Fibres In Low-Consistency Refining**. TAPPI, Vol. 77, N. 12, December 1994, p. 119-123.
- MCINTOSH, D. C. - **The Effect Of Refining On The Structure Of The Fiber Wall**. TAPPI, Vol. 50, N. 10, October 1967, p. 482-488.
- MILICHOVSKY, M. – **A New Concept of Chemistry Refining Processes**. TAPPI Journal, October 1990, p. 221-232.
- MONTGOMERY, D. C. – **Design and Analysis of Experiments**, John Wiley & Sons, 1976.
- NISKANEN, K. (EDITOR) – **Paper Physics**. Papermaking Science and Technology (Book 16), Fapet Oy, Helsinki, 1998.
- NORMAN, B.; MOLLER, G. K.; EK, R.; DUFFY, G. G. - **Hydrodynamics Of Papermaking Fibres In Water Suspension**. Symposium on Fibre –Water Interactions in Papermaking, Oxford. Vol. I. ISBN 0-900219-04-1.1978, p. 195-249.
- OLSON, J.,A.; DROZDIK, J.; MARTINEZ, M.; GARNER,R.; ROBERTSON, A.G.; KEREKES, R. - **Characterizing Fibre Shortening in Low-Consistency Refining Using a Comminution Model**. Powder Technology 129 (2003) 122-129.
- PAAVILAINEN, R.; LUNER, P. – **Wet Fiber Flexibility as a Predictor of Sheet Properties**. Empire State Paper Research Association, Report #84, Chapter IX, Syracuse, NY. 1995.
- PAGE, D. H. – **A Theory for the Tensile Strength of Paper**. TAPPI, Vol. 52, N. 4, April 1969, p. 674-681.
- PAGE, D. H. - **The Collapse Behaviour Of Pulp Fibers**. TAPPI, Vol. 50, N. 9, September 1967, p. 449-455.
- PAGE, D. H.; EL-HOSSEINY, F. - **The Mechanical Properties of Single Wood-Pulp Fibers, Part VI: Fibril Angle and the Shape of the Stress-Strain Curve**. Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 9, N. 4, September 1983, p. TR 99-100.

- PAGE, D. H.; EL-HOSSEINY, F.; WINKLER, K.; BAIN, R. - **The Mechanical Properties of Single Wood-Pulp Fibers, Part I: A New Approach.** Pulp and Paper Magazine of Canada, Vol. 73, N. 8, August 1972, p. 72-76.
- PAGE, D. H.; GRÂCE, J. H. - **The Delamination Of Fiber Walls By Beating And Refining.** TAPPI, Vol. 50, N. 10, October 1967, p. 489-495.
- PAULAPURO, H. (EDITOR) – **Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End.** Papermaking Science and Technology (Book 8), Fapet Oy, Helsinki, 2000. ISBN 952-5216-00-4.
- PETIT- CONIL, M.- **Caractérisation des Fibres, Mieux Comprendre leur Comportement aux Différents Stades des Procédés de Préparation des Pâtes Vierges et Recyclées: Les Outils, Les Méthodes, Quelques Exemples.** Revue A.T.I.P., Vol. 53, N. 3, Juillet-Août 1999, p. 95-104
- RADOSLAVOVA, D. – **Modélisation Hydrodynamique du processus de Raffinage des Pâtes a Papier.** Tese de Doutoramento. Institut National Polytechnique de Grenoble. 1996.
- RADOSLAVOVA, D.; ROUX, J. C.; SILVY, J.; LANTERI, P.; LONGERAY, R. - **A Lubrication Approach Of The Beating Process.** Stockholm, 1996.
- RADOSLAVOVA, D.; SILVY J.; ROUX, J. C. - **Hydrodynamic Modelling Of The Behaviour Of The Pulp Suspensions During Beating And Its Application To Optimising The Refining Process.** Transactions of the 11th Fundamental research symposium in Cambridge: September 1997. The Fundamentals of Papermaking Materials. PIRA International
- RADOSLAVOVA, D.; SILVY J.; ROUX, J. C. - **The Beating of the Pulp Considered as a Hydrodynamic Process.** Third International Refining Conference. TAPPI – PIRA, 20-22 March 1995, Atlanta.
- RADOSLAVOVA, D.; SILVY J.; ROUX, J. C. - **The Concept Of Apparent Viscosity Of Pulp For Beating Analysis And The Development Of The Paper Properties.** TAPPI, March 1996, Philadelphia.
- RANCE (EDITOR), H. F. – **Handbook of Paper Science 1: The Raw Materials and Processing of Papermaking.** Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1980. ISBN 0-444-41778-8.
- RANCE (EDITOR), H. F. – **Handbook of Paper Science 2: The Structure and Physical Properties of Paper.** Elsevier Scientific Publishing Company.

Amsterdam, 1982. ISBN 0-444-41974-8

REEVES, R.; CÂNON, J. - **Stock Preparation Short Course**. San Francisco, TAPPI . ISBN 0-89852-923-9, 1994.

ROUX, J. C. – **Stock Preparation. Part 1 – Pulp Treatment Processes**. 12th Fundamental Research Symposium, Oxford, September, 2001.

ROUX, J. C. ; JORIS, G. ; GAUCAL, G. - **Quelques Ecueils De La Charge Spécifique D'arêtes Dans Le Raffinage A Basse Concentration**. Revue A.T.I.P., Vol. 53, N. 1 Janvier-Mars 1999, p. 3-9.

ROUX, J. C.; CHU, J. P. ; JORIS, G. ; GAUCAL, G. - **Théorie Hydro-Mécanique Du Fonctionnement D'un Raffineur A Basse Concentration**. Revue A.T.I.P., Vol. 53, N. 4-5 Septembre-Octobre 1999, p. 106-116.

SCALLAN, A. M. - **The Accommodation of Water Within Pulp Fibres**. Fibre – Water Interactions in Papermaking. September 1977. Vol.1 ISBN 0-900219 04-1.1978, p. 9-29.

SCOTT, W. E. - **Properties of Paper: An Introduction**. TAPPI, Atlanta, 1989.

SENGER, J.J.; OUELLET, D. - **Factors Affecting the Shear Forces in High-Consistency Refining**. Journal of Pulp and Paper Science: Vol.28 N. 11 November 2002.

SEO, Y. B.; SHIN, Y. C.; JEON, Y. – **Enzymatic and Mechanical Treatment on Chemical Pulp**. 2000 TAPPI Journal Peer Reviewed Papers, November 2000, p. 1-9.

SETH, R.S.; CHAN,B.K. – **Measuring Fiber Strength of Papermaking Pulps**. TAPPI, Vol. 82, N. 11, November 1999, p. 115 – 120.

SHIGLEY, J. E. – **Mechanical Engineering Design**. McGraw-Hill, International Edition, 1986.

SILVY, J. – **Contribution à L'Étude de la Diffusion Multiple de la Lumière dans le Cadre de L'Approximation de Diffusion**. Revue D'Optique Theorique e Instrumentale. Vol. 40, N° 10, Octobre 1961, p.495-517.

SILVY, J. – **Curso de Física do Papel**. École Française de Papeterie, EFPG, 1975.

SILVY, J. – **Curso de Física do Papel**. Mestrado de Pasta e Papel, UBI, 1999.

- SILVY, J. – **Etude Structurale de Milieux Fibreux**. Tese de Doutoramento. École Française de Papeterie, 1980.
- SILVY, J. ; ROMATIER, G. ; CHIODI, R. – **Méthodes Pratiques de Contrôle du Raffinage**. Revue A.T.I.P., Vol.22, N.1.1968, p.31-53.
- SILVY, J. ; SARRET, G. ; JESTIN, R. – **Evaluation des fractions d'eau de retention extra-fibres et intra-fibres dans la mesure du WRV**. Atti del Congresso Europeo di Tecnica Cartaria, Raffinazione della Cellulosa e Proprietá della Carta, EUCEPA – TAPPI, Venecia. 15-19 Settembre 1964, p. 16-185.
- SMOOK, G. A. – **Handbook for Pulp and Paper Technologists**. Joint Textbook Committee of the Paper Industry, 1989.
- STEADMAN, R.; LUNER, P. – **An Improved Test to Measure the Wet Fiber Flexibility of Pulp Fibers**. Empire State Paper Research Association, Report #79, Chapter V, Syracuse, NY. 1995.
- STEVENS, L. V. – Refining. In KOCURECK, M. (ed.) – **Pulp and Paper Manufacture, Vol. 6: Stock Preparation (Chapter X)**. Montreal: TAPPI, 1992. ISBN: 1-895288-27-4.
- TAM DOO, P. A.; KERESKES, R. J.. – **A Method to Measure Wet Fiber Flexibility**. TAPPI, Vol. 64, N. 3, March 1981, p. 113-116.
- TAPPI - **An Introduction To Refining Variables. A Report By The Tappi Stock Preparation Committee**. Vol. 54, N. 10, October 1971, p. 1738-1741.
- TAPPI TEST METHOD – **T 200 sp-96: Laboratory beating of pulp (valley beater method)**. Atlanta, TAPPI Press, 1996. ISBN 0-89852-334-6.
- TELEMECANIQUE – **Altivar 16 speed controller for asynchronous motors: user's manual**. Schneider Group, 1996. VDOC01Q301.
- TESSADRO, A. – **Caractérisation Morphologiques des Fibres par Analyse D'Images**. Tese de Doutoramento. Institut National Polytechnique de Grenoble. 1992.
- TESSADRO, A.; VOILLOT, C. ; SILVY, J. - **Etude des Réseaux Fibreux Par L'analyse D'images**. Revue A.T.I.P., Vol. 47, N. 3, Juin 1993. P. 94-100.
- THUVANDER, F.; GAMSTEDT, E.K.; ALGHREN, P. – **Distribution of Strain of Single Wood Pulp Fibers**. Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol. 16, N. 1, 2001, p. 46-56.

- UESAKA, T. – Determination of Fiber-Fiber Bond Properties. In MARK, R.E. – **Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard**. New York, Volume 2, 1984. ISBN: 0 – 8247 – 7052 – 8.
- VAARASALO, J. - Optical Properties of Paper, Chapter 8. In LEVLIN, J.; SÖDERHJELM, L. (EDITORS). – **Pulp and Paper Testing**. Papermaking Science and Technology (Book 17), Fapet Oy, Helsinki, 1999.
- VAN DEN AKKER, J. A. – Optical Properties of Paper. In RANCE (EDITOR), H. F. – **Handbook of Paper Science 2: The Structure and Physical Properties of Paper**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1982. ISBN 0-444-41974-8
- WATERHOUSE, J. F. – **Refining by Shear**. TAPPI, Vol. 53, N. 10, October 1970, p. 1890-1894.
- WATERHOUSE, J. F. – **Whither Refining?** United Kingdom, Pira. 4th International Refining Conference, Fiuggi, Italy. 18-20 March. 1997.
- YOUNG, J.H. – **Fiber Preparation and Approach Flow**. In CASEY, J. P. (editor), **Pulp and Paper – Chemistry and Chemical Technology**. Third Edition, Volume II. New York, Wiley & Sons. 1980, p.821-913.

Anexo 1 – Determinação da área sobreposta rotor-estator

Para a determinação da área sobreposta entre o rotor e o estator adoptou-se a seguinte metodologia:

1. Desenho à escala real das lâminas do rotor e do estator em dois acetatos transparentes (veja-se Figura 0-1).
2. Contraposição dos dois acetatos.
3. Medição da área da sobreposição.
4. Repetição deste procedimento para várias posições relativas entre as lâminas do rotor e do estator.

Esta metodologia é válida pelo facto de o estator se conformar ao rotor. Este procedimento permitiu verificar que a área de contacto corresponde à área de duas lâminas do estator ($1.019,5\text{mm}^2$).

As dimensões na Figura 0-1 estão expressas em metros.

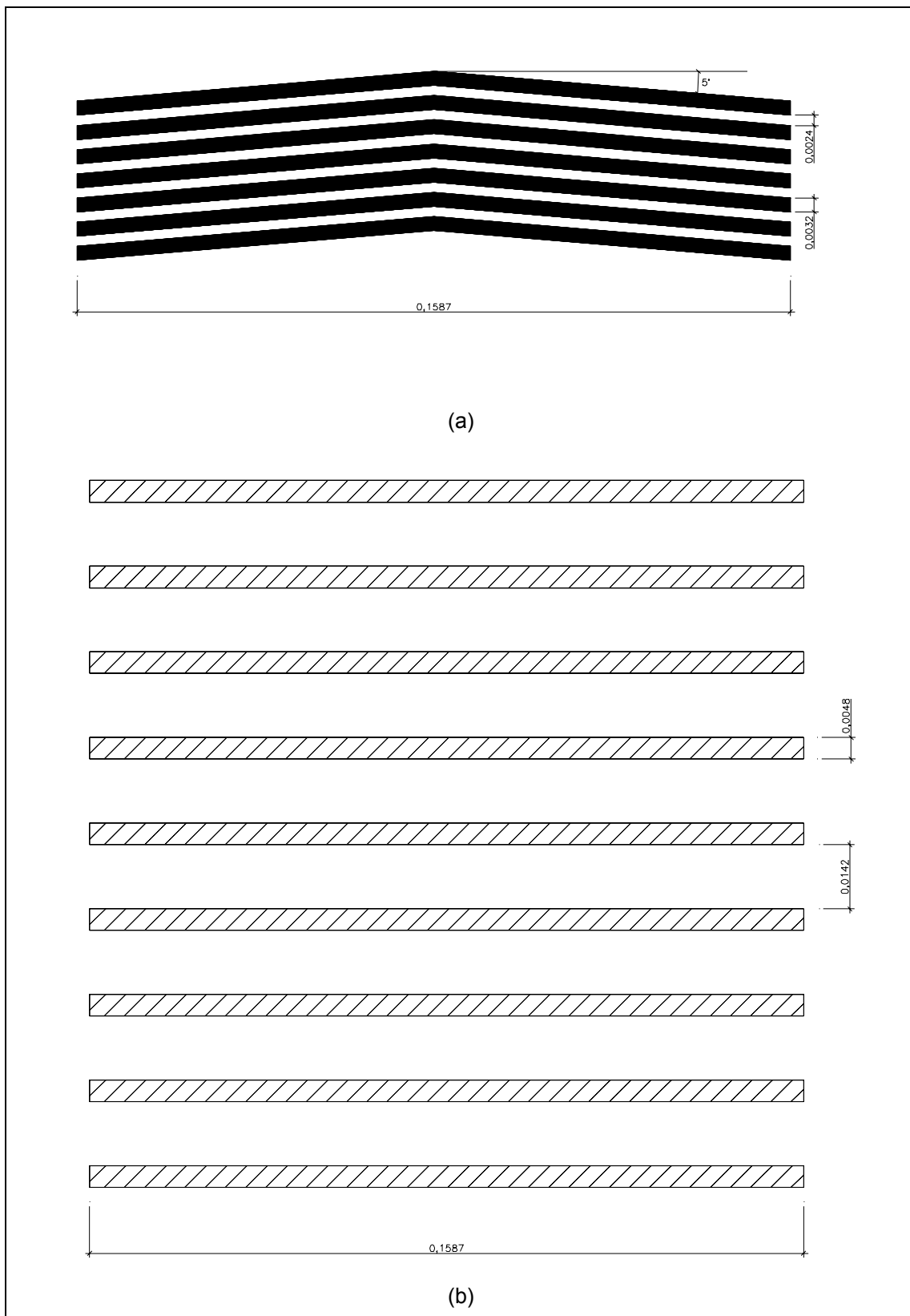


Figura 0-1 Esquemas das lâminas do estator (a) e do rotor (b).

Anexo 2 – Curva de calibração da velocidade de rotação

Foi efectuada uma curva de calibração relacionando a velocidade de rotação do rotor Ω (rpm) com a frequência da corrente de alimentação ϕ (Hz). O motor do equipamento é trifásico, a corrente de alimentação tem uma voltagem de 220V e a sua potência é de 0,55kW. Variou-se a frequência da corrente de alimentação entre 30Hz e 60 Hz. Foi utilizado um estroboscópio para se medir a frequência de rotação do rotor. Os resultados obtidos estão representados no gráfico abaixo. Obteve-se uma relação linear entre as duas grandezas segundo a expressão:

$$\Omega = 10,57 \cdot \phi + 5,4 \quad r^2 = 0,999 \quad \text{Equação 0-1}$$

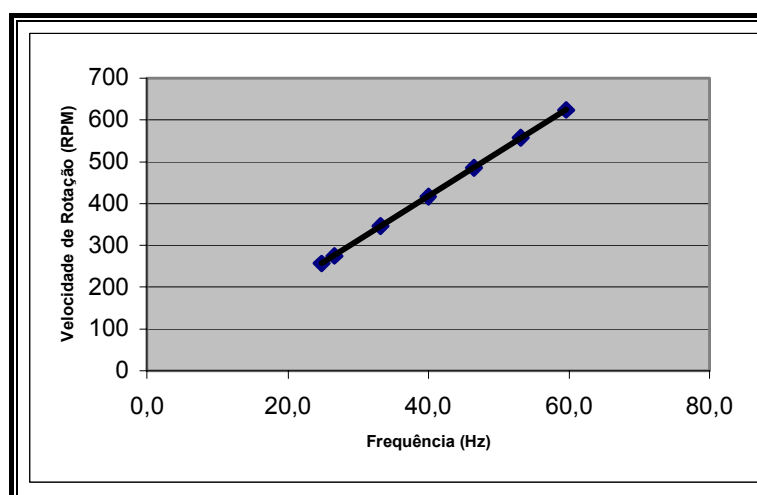


Gráfico 0-1 Velocidade de rotação do rotor (rpm) do Valley em função da frequência de alimentação do motor (Hz).

Anexo 3 – Curvas de calibração do refinador

Estão representadas seguidamente as curvas de refinação obtidas após calibração do refinador Valley para a pasta padrão de resinosa, o pinho silvestre em estudo nesta tese, o eucalipto padrão, o eucalipto e a bétula em estudo.

As curvas obtidas para a pasta padrão de resinosa estão representadas na Gráfico 0-2. O seu intervalo de confiança a um nível de significância de 5% é de $\pm 2,5^{\circ}\text{SR}$, utilizando um valor médio da variância amostral (com 4 amostras). Estes ensaios foram efectuados regularmente num período de aproximadamente 12 meses, abarcando a realização das refinações em estudo.

As curvas do pinho silvestre em estudo estão representadas na Gráfico 0-3. O respectivo intervalo de confiança a um nível de significância de 5% é de $\pm 3,5^{\circ}\text{SR}$ utilizando um valor médio da variância amostral (com 5 amostras).

As curvas da pasta de eucalipto padrão estão representadas no Gráfico 0-4. O intervalo de confiança obtido a um nível de significância de 5% é de $\pm 2,0^{\circ}\text{SR}$, utilizando-se um valor médio da amplitude amostral (com 2 amostras).

A curva obtida para o eucalipto em estudo está representada no Gráfico 0-5 e a da bétula no Gráfico 0-6.

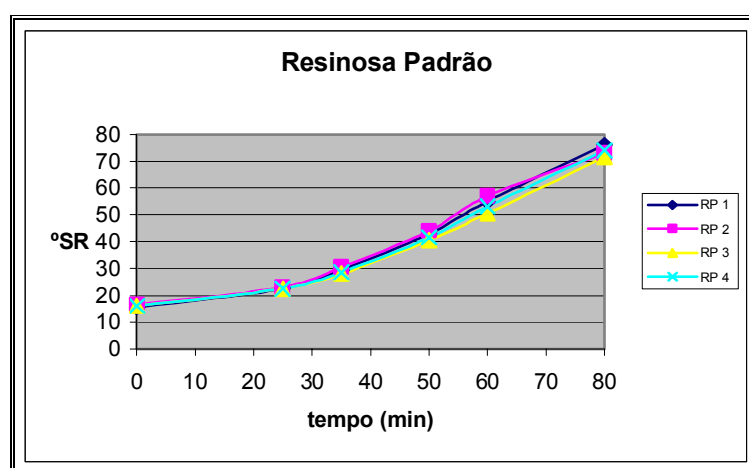


Gráfico 0-2 Curva de refinação da pasta padrão de resinosa.

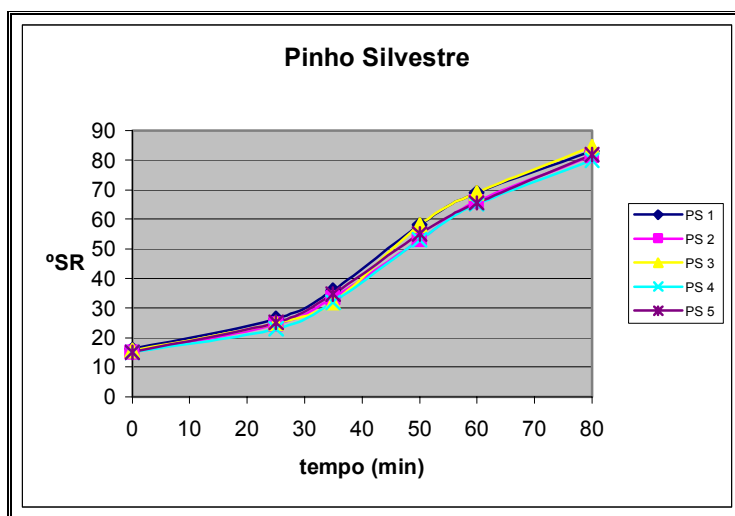


Gráfico 0-3 Curva de refinação da pasta de pinho silvestre (em estudo).

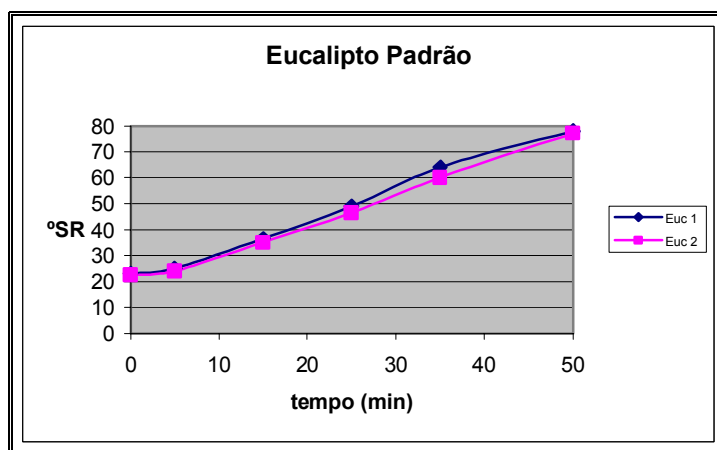


Gráfico 0-4 Curva de refinação da pasta padrão de eucalipto.

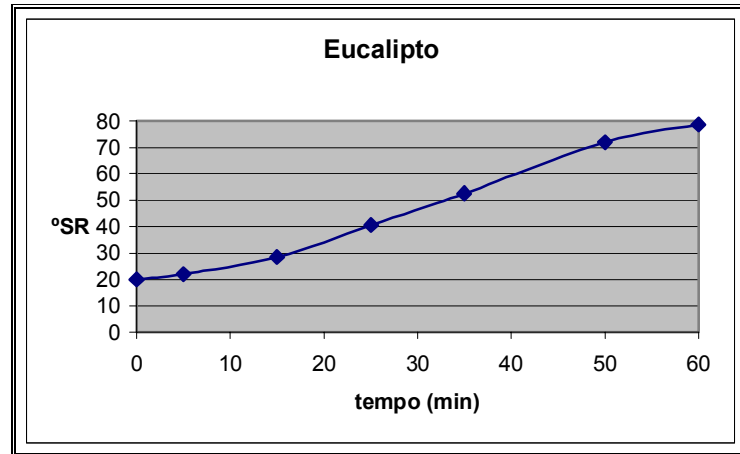


Gráfico 0-5 Curva de refinação da pasta de eucalipto (em estudo).

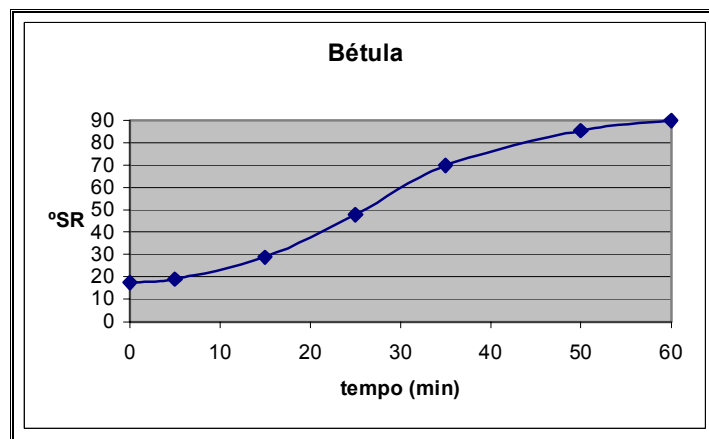


Gráfico 0-6 Curva de refinação da pasta de bétula (em estudo).

Anexo 4 – Curva de calibração do LVDT

Para estabelecer a curva de calibração efectuou-se o seguinte procedimento:

1. Acondicionaram-se folhas de “acetato” no laboratório de ensaios físicos (condições do ambiente controlado: 23°C, 50% RH³⁹).
2. Determinou-se, utilizando o medidor de espessura, o valor médio da espessura de um acetato, de dois acetatos e de três acetatos sobrepostos.
3. Inseriu-se no entreferro do Valley um acetato na ausência de qualquer carga, registaram-se os valores do LVDT à medida que se rodava o rotor lentamente com a mão.
4. Repetiu-se este procedimento com uma folha de acetato com cargas crescentes de 4,5kg, 5,5kg e 6,5kg.
5. Executou-se o procedimento dos dois pontos anteriores com duas folhas de acetato no rotor e seguidamente com três folhas de acetato.

Com os valores obtidos foi possível construir-se as seguintes linhas de calibração para cargas de 0kg, 4,5kg, 5,5kg e 6,5kg:

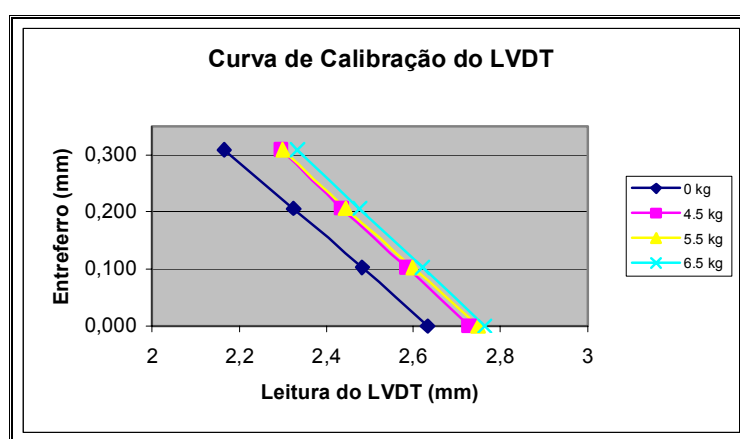


Gráfico 0-7 Curvas de Calibração do LVDT (Data: 2005.05.12)

³⁹ RH: humidade relativa.

O desgaste das lâminas do refinador conduz a uma translação para a esquerda das linhas de calibração para as diferentes cargas. É possível acompanhar-se assim esse desgaste. Os valores de leitura com o entreferro nulo antes de todas as refinações e após todas as refinações deste trabalho de investigação estão expressos na tabela seguinte:

Análise do desgaste das lâminas			
Carga	Leitura do LVDT com entreferro nulo (mm)		Desgaste (μm)
	2004.02.11	2005.05.12	
4,5kg	3,108	2,729	379
5,5kg	3,119	2,749	370
6,5kg	3,137	2,764	373

Figura 0-2 Análise do desgaste das lâminas.

O valor médio para o desgaste no rotor do Valley neste período foi de $374\mu\text{m}^{40}$.

⁴⁰ A variabilidade da posição do entreferro nulo com diferentes cargas resultam de diferenças na deflexão do braço da alavanca do refinador quando sob diferentes cargas.

Anexo 5 – Curvas de Ajuste da Evolução do LVDT

As curvas de ajuste da evolução do entreferro foram obtidas com a seguinte sequência de tratamento de dados:

1. Efectuou-se a filtragem das leituras do LVDT recolhidos cada 0,1s, obtendo-se os valores médios por minuto.
2. Obteve-se o valor do entreferro através da aplicação da relação adequada, conforme explicitado no Anexo 4.
3. Obtenção das curvas de ajuste mais adequadas. Para o pinho silvestre e o eucalipto foi possível obterem-se relações lineares, enquanto que para a bétula obtiveram-se curvas de segundo grau.

Apresentam-se seguidamente exemplos de curvas de ajuste obtidas nas condições padrão O (5,5kg; 500rpm) para cada matéria-prima.

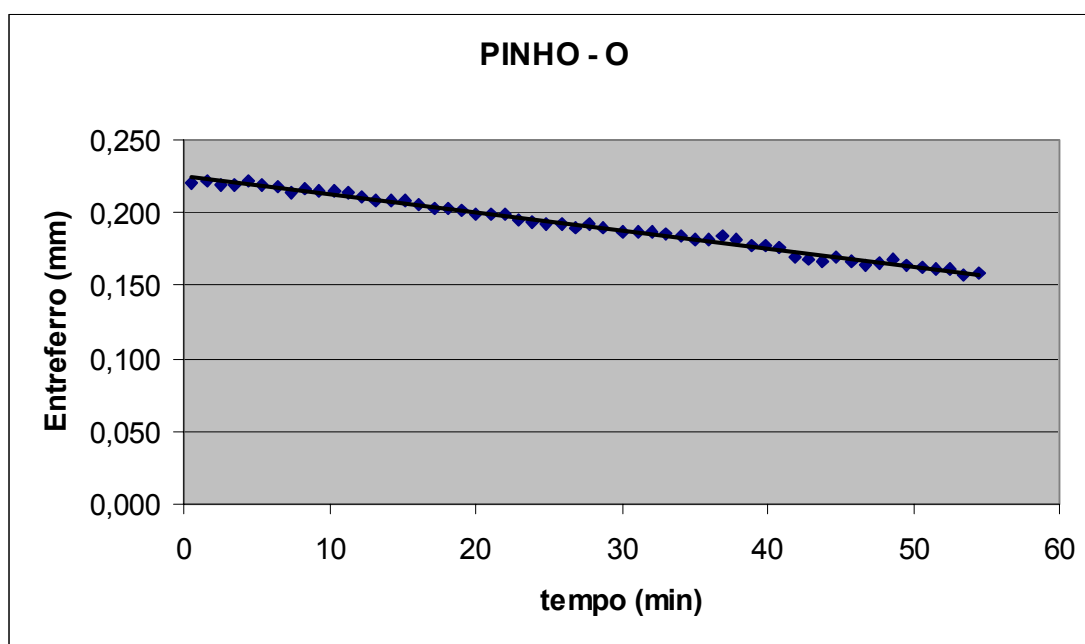


Gráfico 0-8 Linha de ajuste do entreferro do pinho silvestre nas condições padrão.

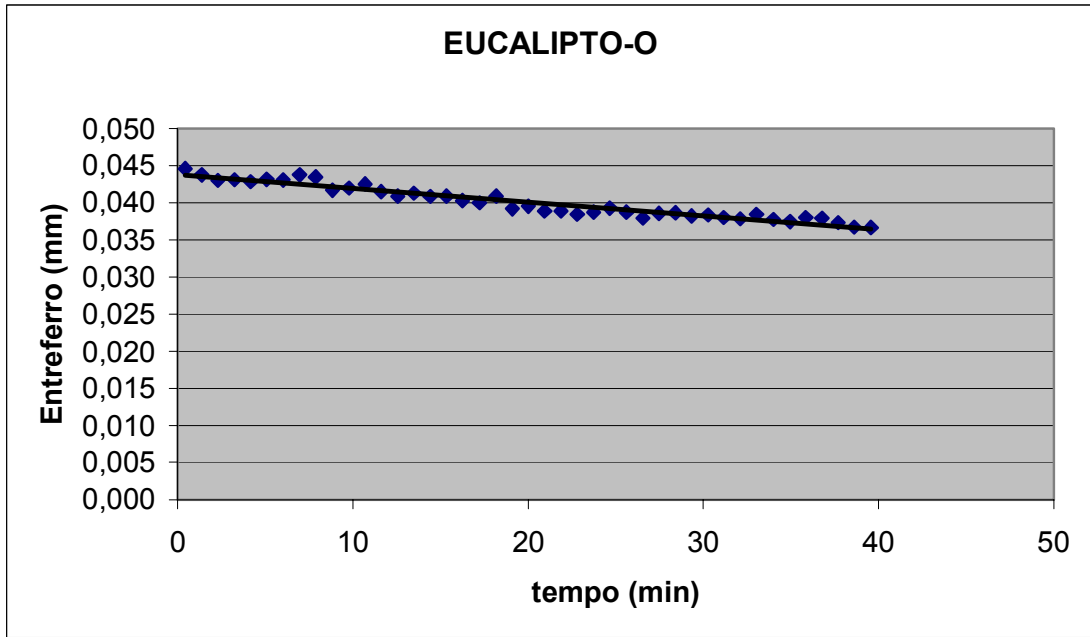


Gráfico 0-9 Linha de ajuste do entreferro do eucalipto nas condições padrão.

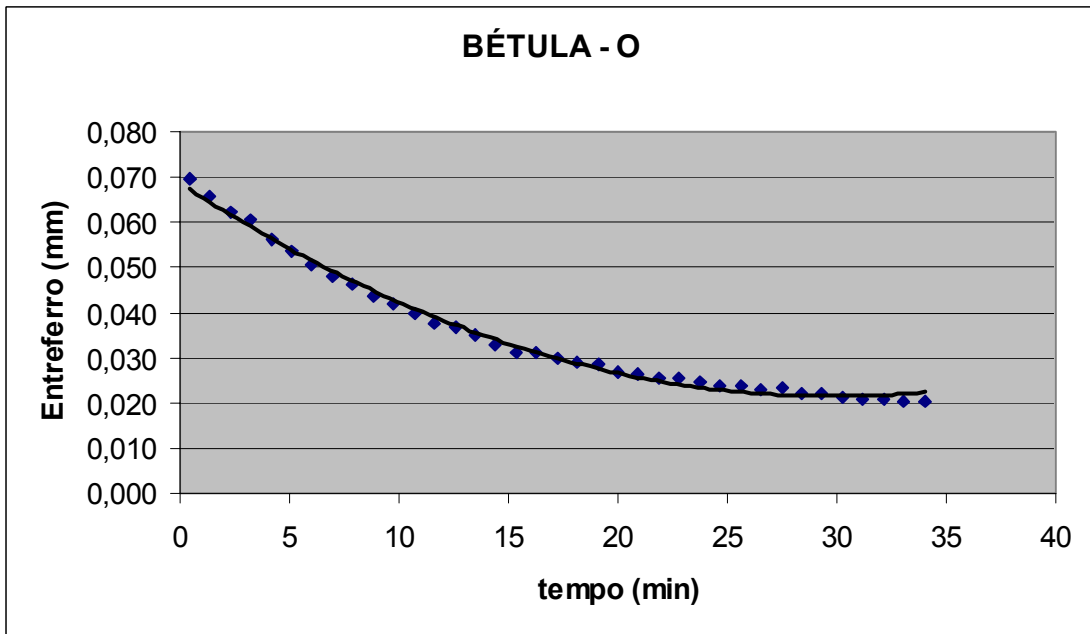


Gráfico 0-10 Linha de ajuste do entreferro da bétula nas condições padrão.

Anexo 6 – Análise de confiança ao Morfi

As tabelas seguintes apresentam a análise de confiança às medições das propriedades morfológicas do pinho silvestre (Tabela 0-1), do eucalipto (Tabela 0-2) e da bétula (Tabela 0-3). Nelas apresentam-se os valores da média total, do desvio padrão amostral, do coeficiente de variação, dos limites de confiança a 5% em valor absoluto e em valor percentual para cada uma das propriedades medidas.

Pinho	Média Total	DPA	CV (%)	LC 5%	LC 5% (%)
Nº de Fibras (g ⁻¹)	6,5	0,2	2,5%	0,2	3,6%
L _a (mm)	1,08	0,02	1,4%	0,02	1,8%
L _{pl} (mm)	1,72	0,02	1,4%	0,03	1,8%
Largura (µm)	32,2	0,2	0,7%	0,3	0,9%
Massa Linear (mg/m)	0,154	0,003	2,2%	0,004	2,8%
Ângulo das dobras (°)	131,0	0,5	0,4%	0,7	0,5%
Fibras com Dobras (%)	31,3	0,6	2,1%	0,8	2,5%
Curvatura (%)	9,8	0,2	1,7%	0,2	2,1%
Macrofibrilas (%)	0,68	0,02	3,2%	0,03	4,0%
Pontas Quebradas (%)	45,6	1,0	2,3%	1,3	2,8%
Finos em Comp. (%)	26,2	0,8	3,1%	1,0	3,7%
Finos em Área (%)	3,7	0,3	9,3%	0,4	10,3%

Tabela 0-1 Análise de confiança às propriedades morfológicas do pinho silvestre medidas no Morfi.

Eucalipto	Média Total	DPA	CV (%)	LC 5%	LC 5% (%)
Nº de Fibras (g ⁻¹)	22,2	0,3	1,5%	0,4	1,8%
L _a (mm)	0,640	0,003	0,5%	0,004	0,6%
L _{pl} (mm)	0,756	0,004	0,5%	0,005	0,6%
Largura (µm)	18,9	0,1	0,6%	0,1	0,7%
Massa Linear (mg/m)	0,071	0,001	1,5%	0,001	1,9%
Ângulo das dobras (°)	130,1	0,4	0,3%	0,5	0,4%
Fibras com Dobras (%)	34,9	0,6	1,7%	0,7	2,1%
Curvatura (%)	8,4	0,1	1,1%	0,1	1,4%
Macrofibrilas (%)	0,60	0,02	4,2%	0,03	5,1%
Pontas Quebradas (%)	20,3	0,5	2,5%	0,6	3,1%
Finos em Comp. (%)	28,2	0,4	1,6%	0,5	1,9%
Finos em Área (%)	9,1	0,3	3,5%	0,4	4,2%

Tabela 0-2 Análise de confiança às propriedades morfológicas do eucalipto medidas no Morfi.

Bétula	Média Total	DPA	CV (%)	LC 5%	LC 5% (%)
Nº de Fibras (g ⁻¹)	13,7	0,2	1,8%	0,3	2,2%
L _a (mm)	0,715	0,005	0,6%	0,006	0,8%
L _{pl} (mm)	0,905	0,008	0,9%	0,010	1,1%
Largura (µm)	24,5	0,1	0,6%	0,2	0,7%
Massa Linear (mg/m)	0,102	0,005	5,7%	0,006	6,2%
Ângulo das dobras (°)	130,5	0,5	0,4%	0,6	0,4%
Fibras com Dobras (%)	38,8	0,6	1,5%	0,7	1,8%
Curvatura (%)	9,1	0,1	1,4%	0,2	1,8%
Macrofibrilas (%)	0,67	0,02	3,2%	0,03	3,8%
Pontas Quebradas (%)	28,9	0,7	2,5%	0,9	3,1%
Finos em Comp. (%)	32,8	0,6	2,0%	0,8	2,4%
Finos em Área (%)	7,4	0,3	4,7%	0,4	5,8%

Tabela 0-3 Análise de confiança às propriedades morfológicas da bétula medidas no Morfi.

Anexo 7 – Análise de confiança ao CyberFlex

A tabela seguinte apresenta a análise de confiança às medições de flexibilidade das amostras analisadas do pinho silvestre (PS), do eucalipto (EUC) e da bétula (BET).

Amostra	N.º Fibras	Média			Índice		
		Índice	Absoluto	Relativo	DPA	LC 5%	LC 5% (%)
BET_0min	464	46,8	2.36 E11	23,6	17,7	1,4	3,0%
BET_O1	503	56,1	5.53 E11	55,3	17,9	1,3	2,3%
BET_O2	381	58,9	7.19 E11	71,9	17,1	1,4	2,4%
BET_O3	251	57,6	6.39 E11	63,9	19,0	2,0	3,5%
BET_A2	295	57,7	6.41 E11	64,1	19,0	1,8	3,1%
BET_B2	313	57,8	6.47 E11	64,7	18,5	1,7	2,9%
BET_C2	356	53,0	4.16 E11	41,6	18,0	1,6	3,0%
BET_D2	669	57,7	6.41 E11	64,1	16,8	1,1	1,9%
EUC_0min	277	47,5	2.51 E11	25,1	16,6	1,6	3,4%
EUC_O1	634	55,1	5.04 E11	50,4	16,8	1,1	2,0%
EUC_O2	519	59,1	7.33 E11	73,3	17,1	1,2	2,0%
EUC_O3	262	62,3	9.82 E11	98,2	16,3	1,7	2,7%
EUC_A2	340	61,0	8.68 E11	86,8	17,6	1,6	2,6%
EUC_B2	289	61,0	8.68 E11	86,8	16,6	1,6	2,6%
EUC_C2	187	56,1	5.54 E11	55,4	16,0	1,9	3,4%
EUC_D2	167	57,7	6.43 E11	64,3	18,2	2,3	4,0%
PS_0min	434	50,3	3.26 E11	32,6	19,0	1,5	3,0%
PS_A2	286	62,0	9.57 E11	95,7	15,5	1,5	2,4%
PS_B2	294	64,6	1.22 E12	122,0	16,0	1,5	2,3%
PS_C2	324	63,3	1.08 E12	108,0	14,4	1,3	2,1%
PS_D2	238	60,3	8.17 E11	81,7	16,9	1,8	3,0%
PS_O2	301	59,8	7.79 E11	77,9	15,2	1,4	2,3%
PS_O1_R	313	60,7	8.47 E11	84,7	18,1	1,7	2,8%
PS_O2_R	323	56,9	5.99 E11	59,9	17,5	1,6	2,8%
PS_O3_R	333	60,5	8.30 E11	83,0	16,2	1,5	2,5%

Tabela 0-4 Análise de confiança ao Cyberflex.

Nela apresenta-se o número de fibras medidas em cada ensaio; os valores da média para cada ensaio do índice de flexibilidade, da flexibilidade absoluta ($\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$) e da flexibilidade relativa (dada pela razão entre a flexibilidade absoluta e $10^{11} \text{ N}^{-1}\text{m}^{-2}$); finalmente discrimina-se para cada ensaio o desvio padrão amostral, os limites de confiança a 5% em valor absoluto e em valor percentual para o índice de flexibilidade. Analisaram-se as amostras para cada uma das matérias-primas sem refinação, nos três níveis de energia específica de refinação para as condições padrão O e nas quatro condições de refinação A, B, C e D no nível de energia específica de refinação E_2 . Para o pinho silvestre analisou-se o ensaio da condição de refinação O no seu nível E_2 e ainda os ensaios de repetição em O para os três níveis de energia.

Pode-se constatar pela observação da tabela que os limites de confiança a 5% oscilam entre 2,5% e 5% do índice de flexibilidade médio medido, o que demonstra a fiabilidade destes ensaios.

Anexo 8 – Coeficientes das Equações de Ajuste

Conforme foi definido no subcapítulo 3.4.1, N e L variam no interior dos seguintes intervalos:

$$-1 \leq N \leq +1 \quad \text{Equação 0-2}$$

$$-1 \leq L \leq +1 \quad \text{Equação 0-3}$$

já que os valores testados para N e para L são 0, +1 e -1.

Para cada propriedade P_i obteve-se em cada nível de energia E_j uma expressão linear em N e L com a estrutura seguinte:

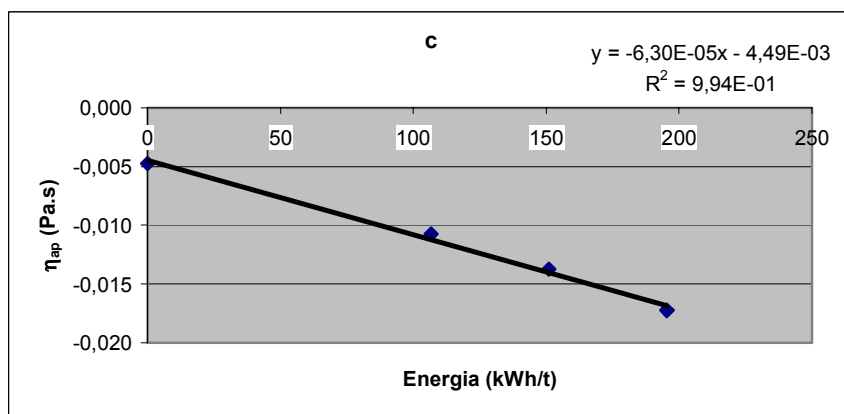
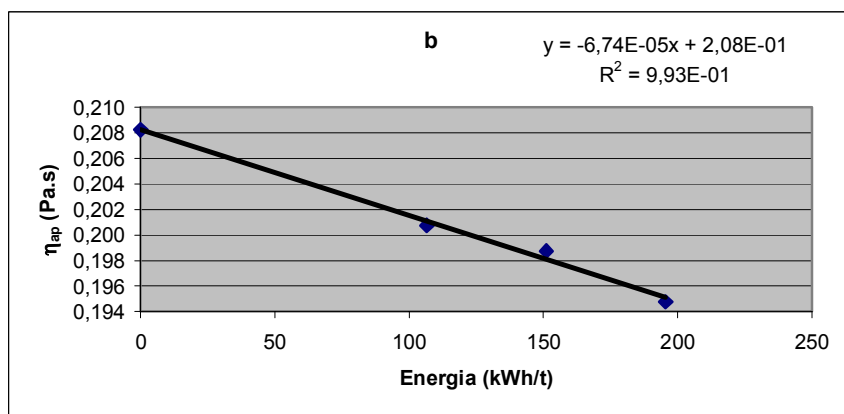
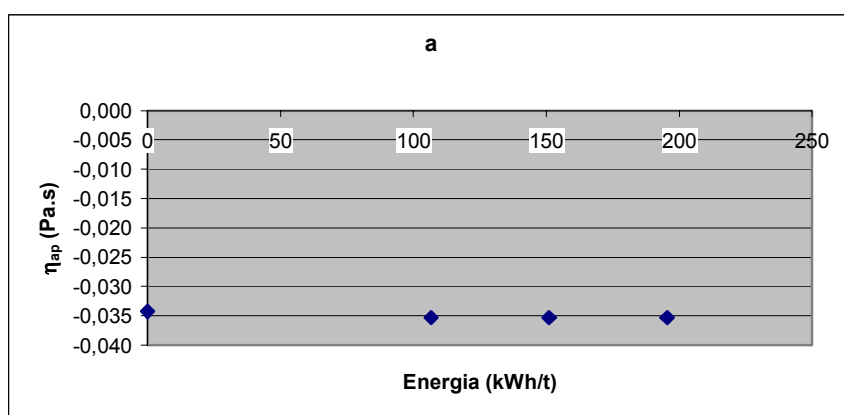
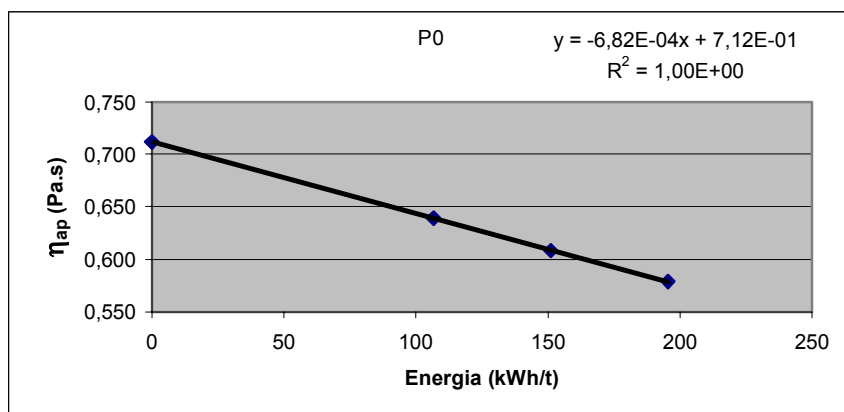
$$P_i^j = \alpha_i^j \cdot N + \beta_i^j \cdot L + \delta_i^j \cdot N \cdot L + P_0^{i,j} \quad \text{Equação 0-4}$$

em que P_i^j é a propriedade P_i em análise no nível E_j , α_i^j é o coeficiente linear de N , β_i^j é o coeficiente linear de L , δ_i^j é o parâmetro de interação e $P_0^{i,j}$ é a ordenada na origem.

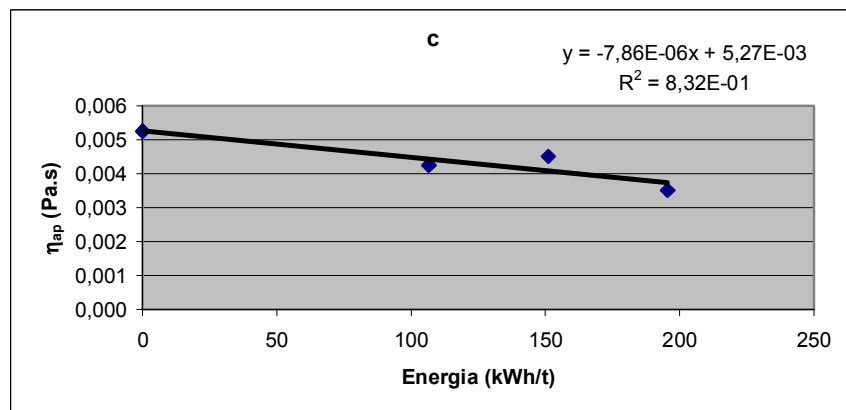
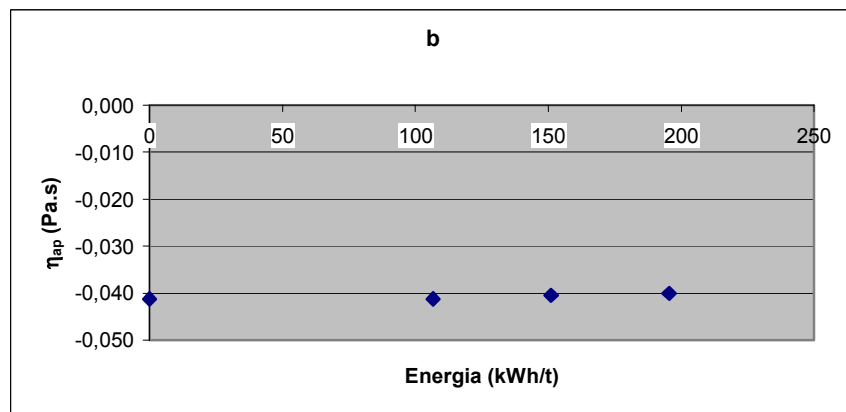
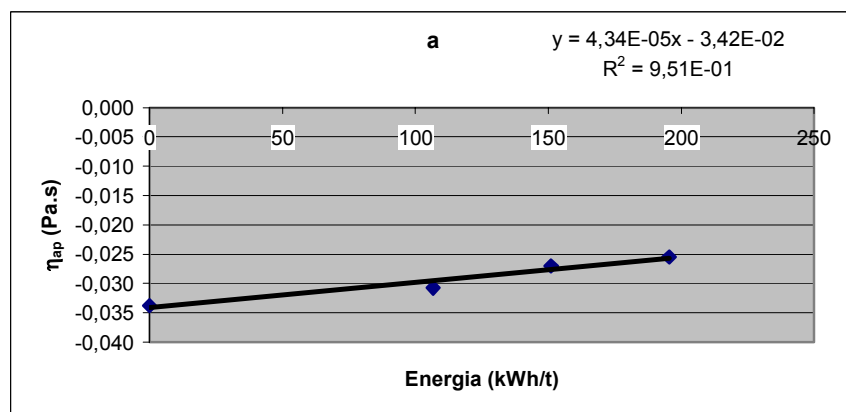
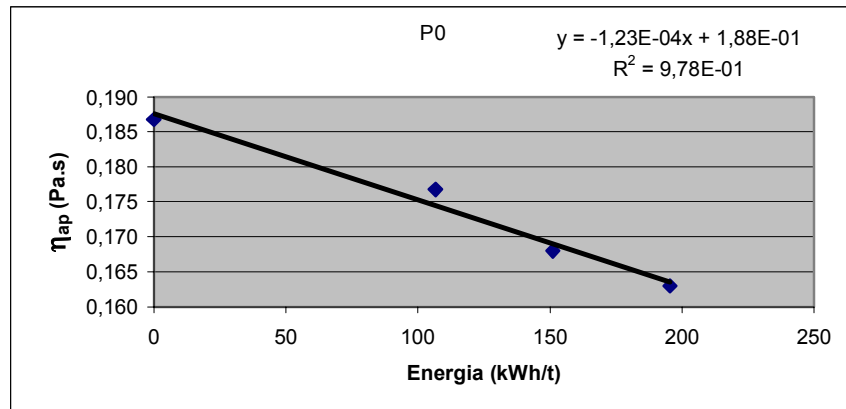
Os parâmetros α_i^j , β_i^j , δ_i^j e $P_0^{i,j}$ foram posteriormente ajustados em equações função da energia específica de refinação em kWh/t (correspondente a quatro níveis energéticos, o nível de energia correspondente às pastas no instante inicial da refinação mais os três níveis de energia estudados). Dependendo dos casos, obtiveram-se para estes parâmetros equações de grau zero, de primeiro grau e de segundo grau. Em cada matéria-prima obteve-se assim uma equação global para cada propriedade que a relaciona com a velocidade de rotação normalizada N , a carga normalizada L e a energia específica de refinação em kWh/t (ou então a energia total específica consumida, já que se conhece o rendimento da máquina para cada condição de operação).

Neste anexo estão representados seguidamente, para cada expressão obtida em cada matéria-prima, os gráficos contendo os valores experimentais e as curvas de ajuste em função da energia específica de refinação (kWh/t) do ponto central $P_0^{i,j}$, sob o título $P0$; do coeficiente α_i^j relativo a N , sob o título de a ; do coeficiente β_i^j relativo a L , sob o título de b ; do coeficiente δ_i^j relativo à interação, sob o título de c .

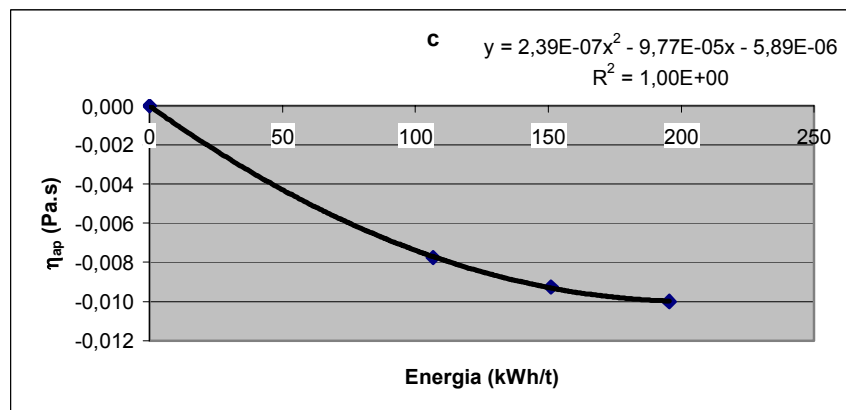
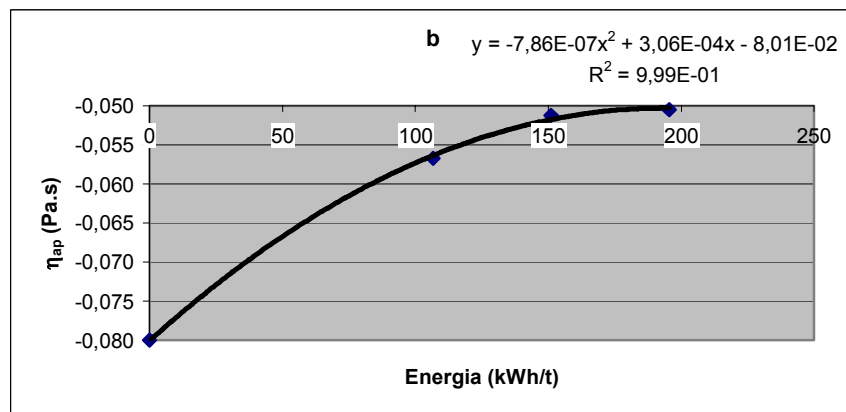
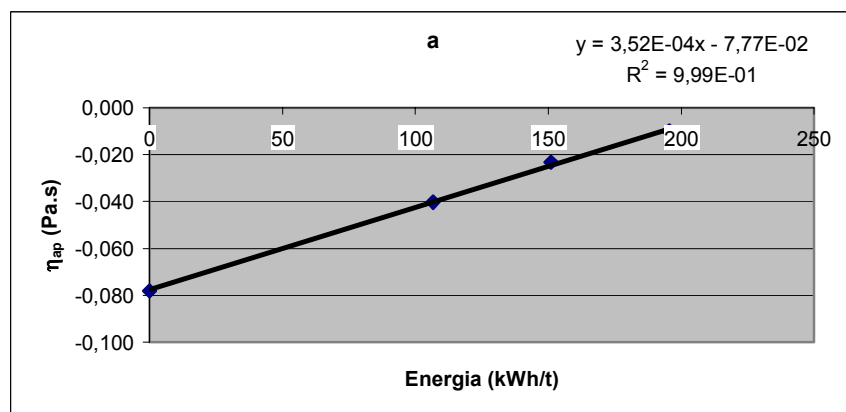
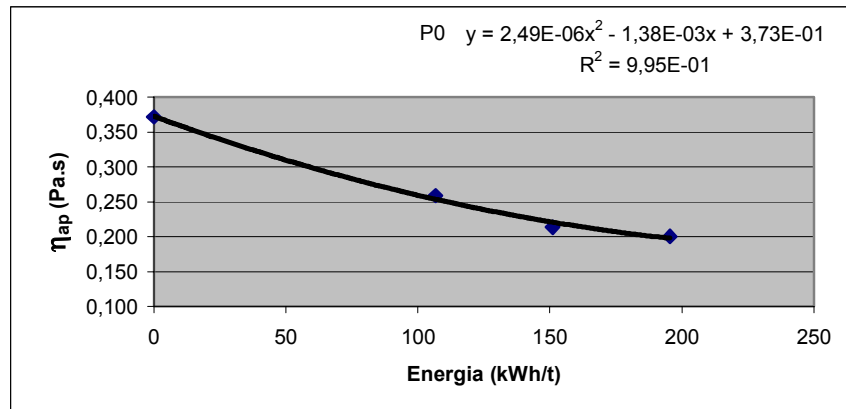
PINHO - Viscosidade Aparente (Pa.s)



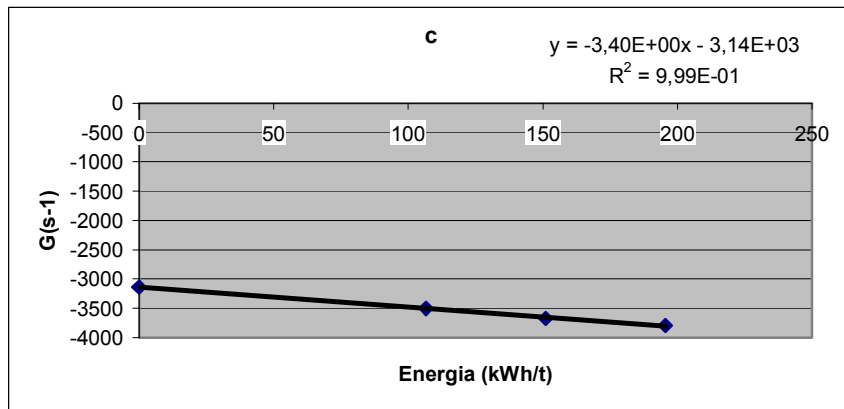
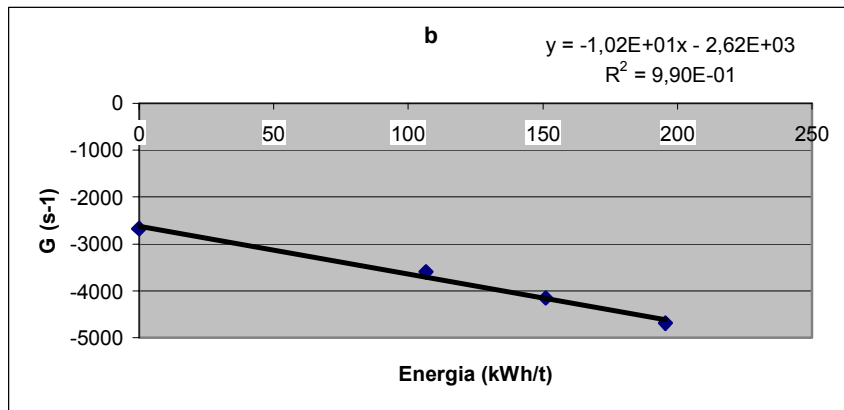
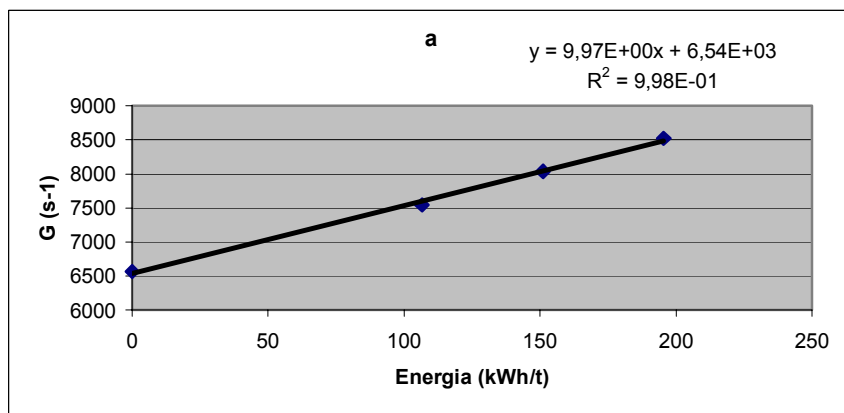
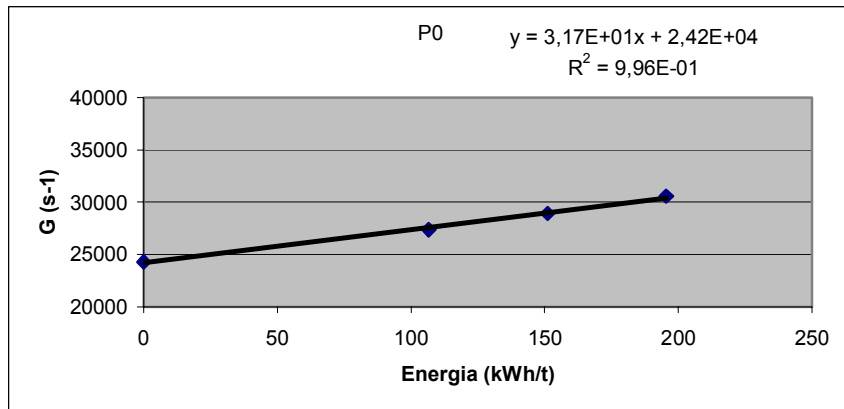
EUCALIPTO - Viscosidade Aparente (Pa.s)



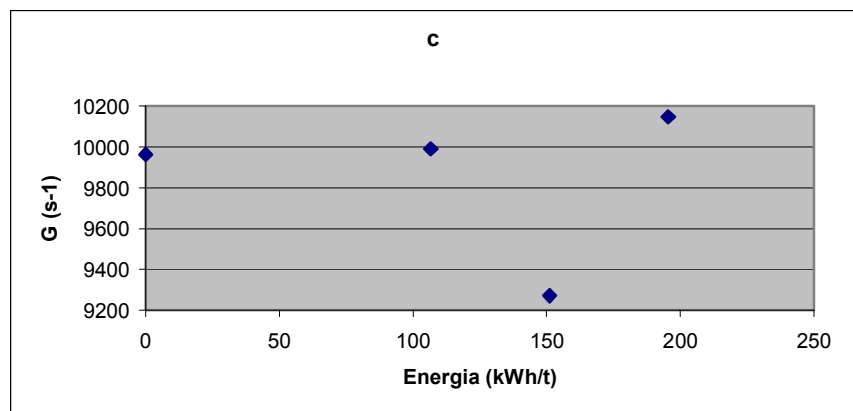
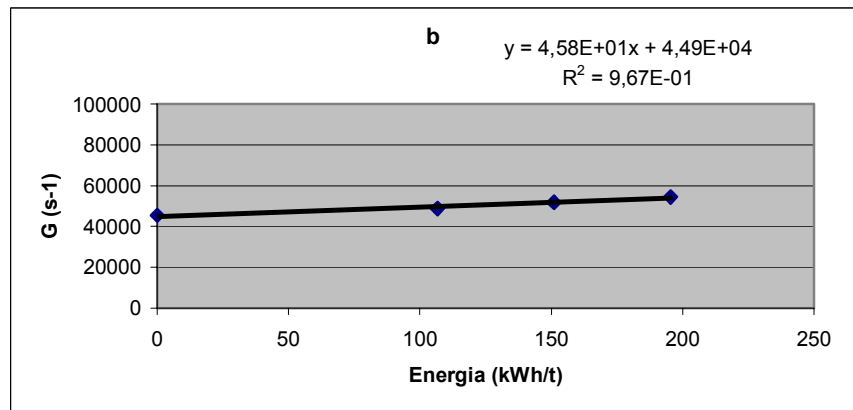
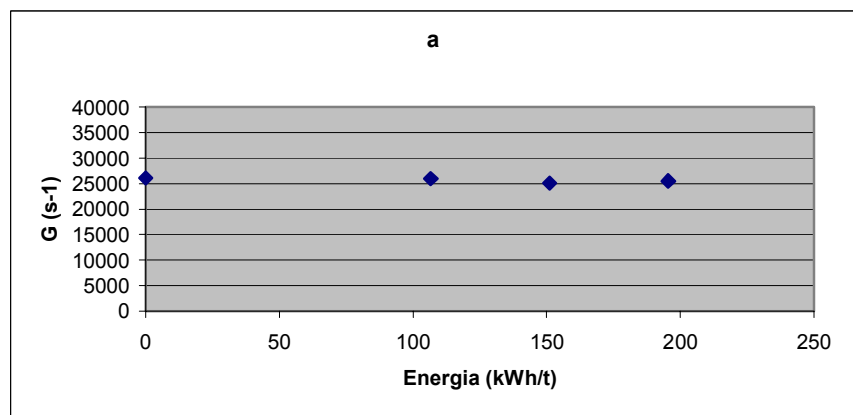
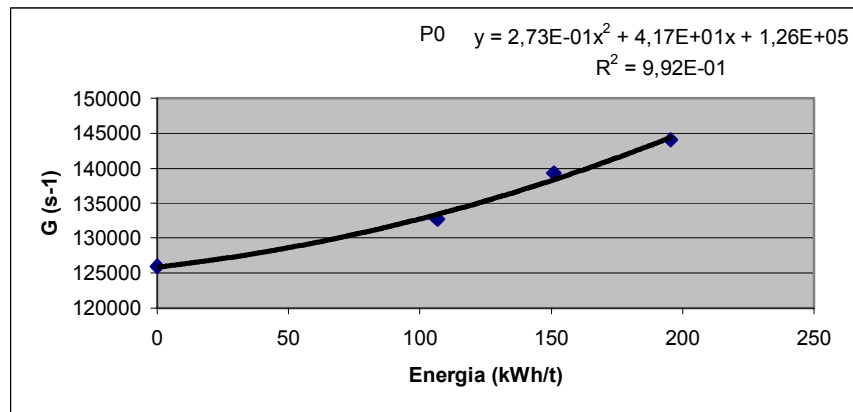
BÉTULA - Viscosidade Aparente (Pa.s)



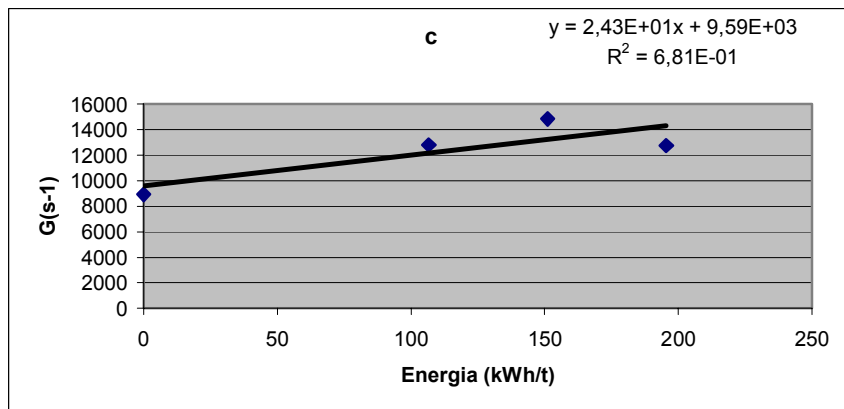
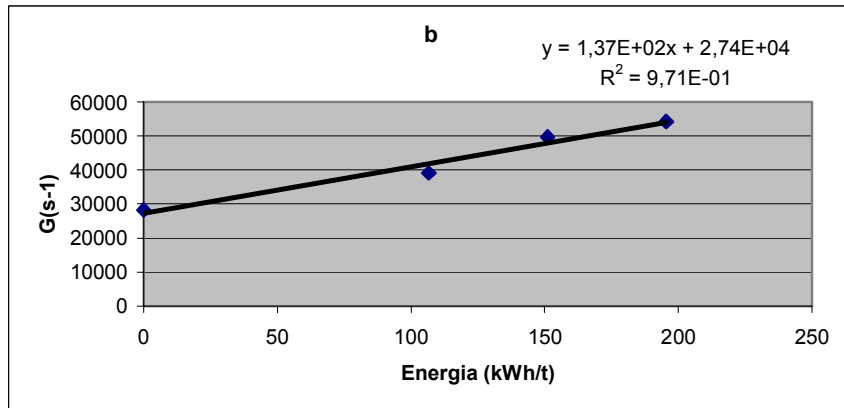
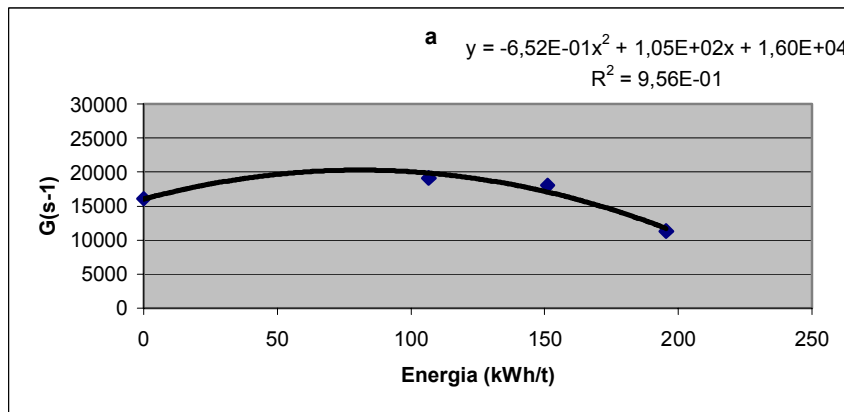
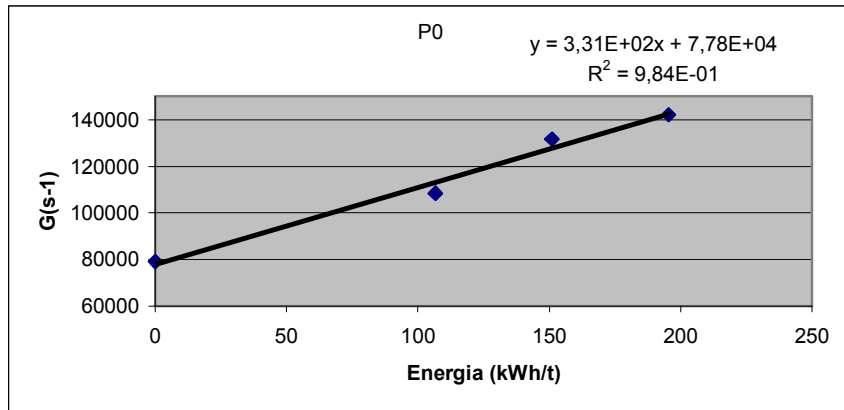
PINHO – Gradiente de Velocidade G (s⁻¹)

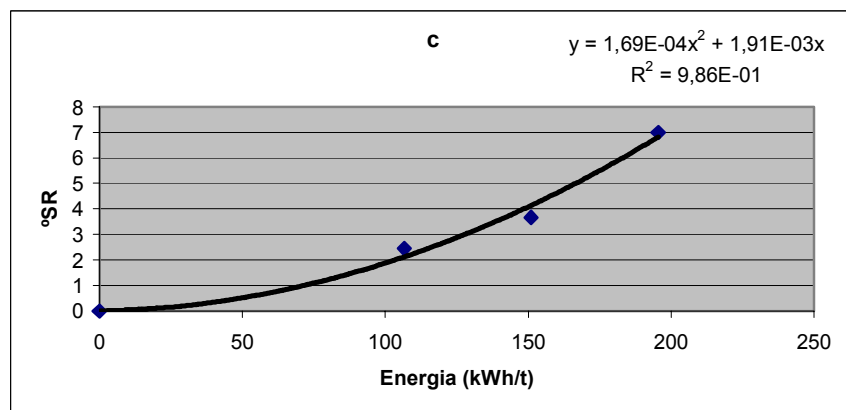
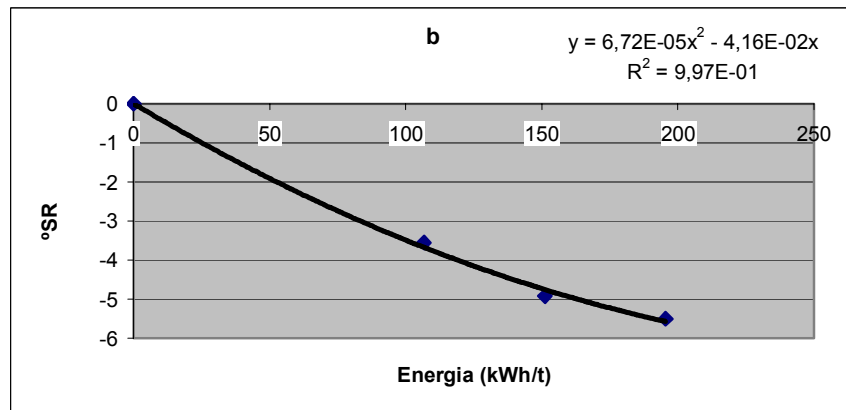
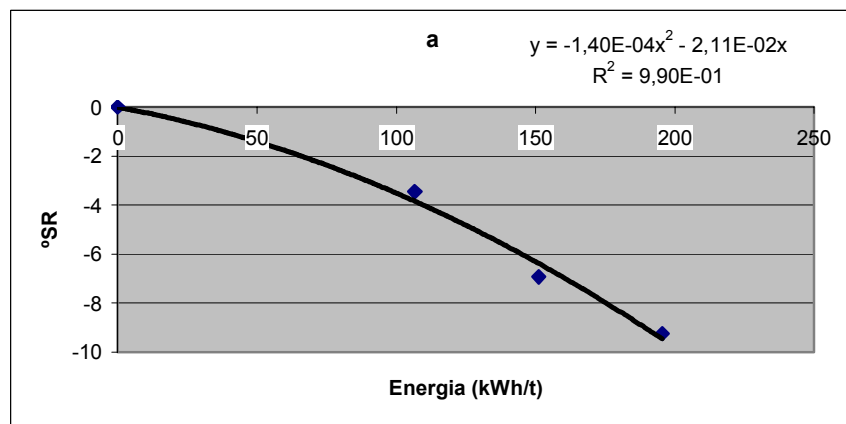
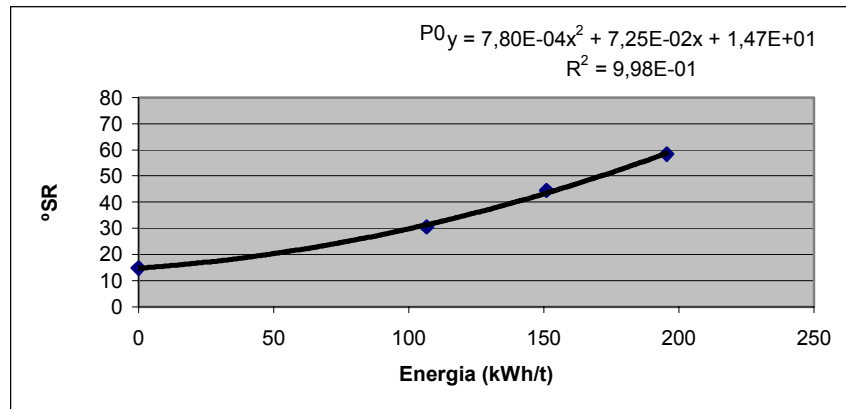


EUCALIPTO – Gradiente de Velocidade G (s⁻¹)

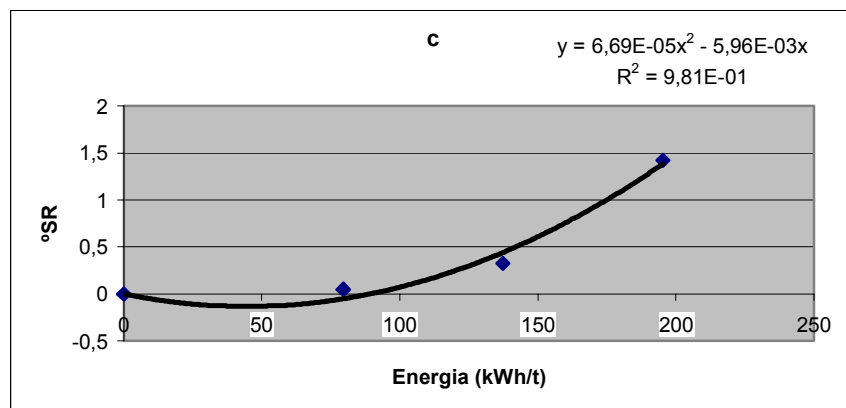
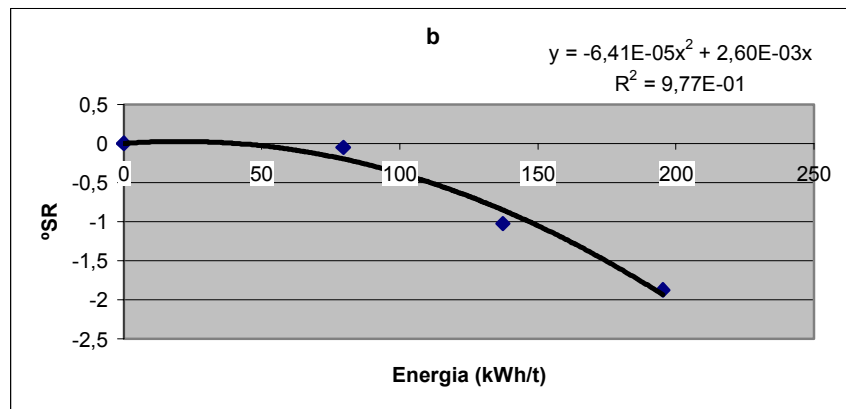
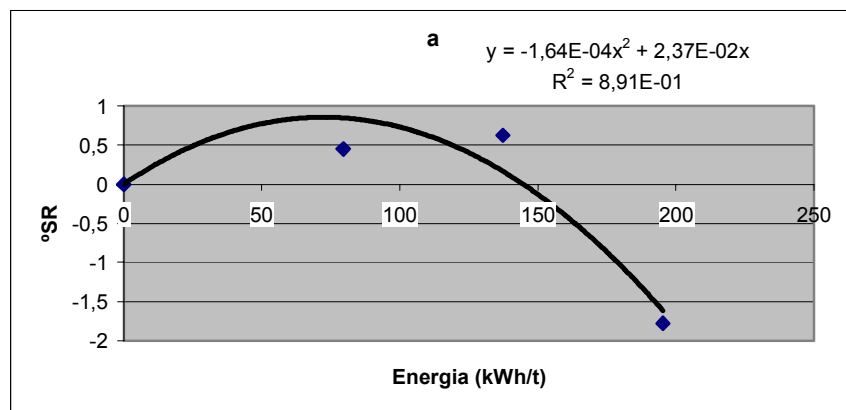
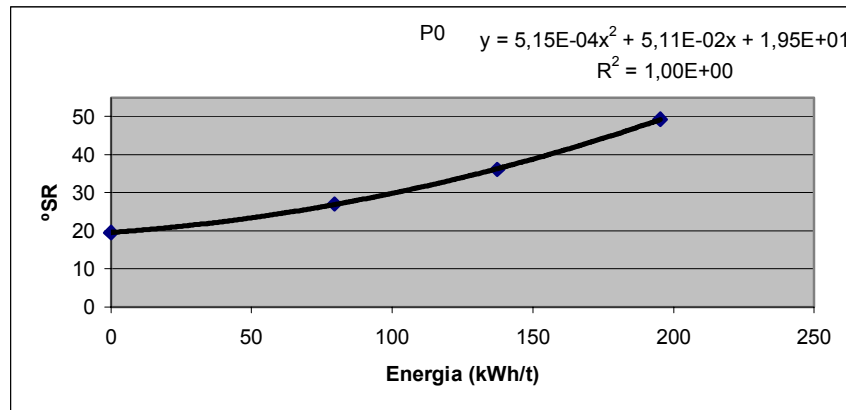


BÉTULA – Gradiente de Velocidade G (s⁻¹)

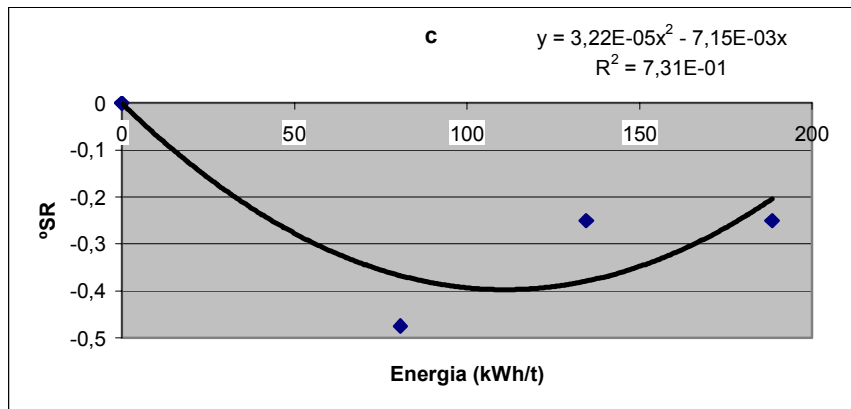
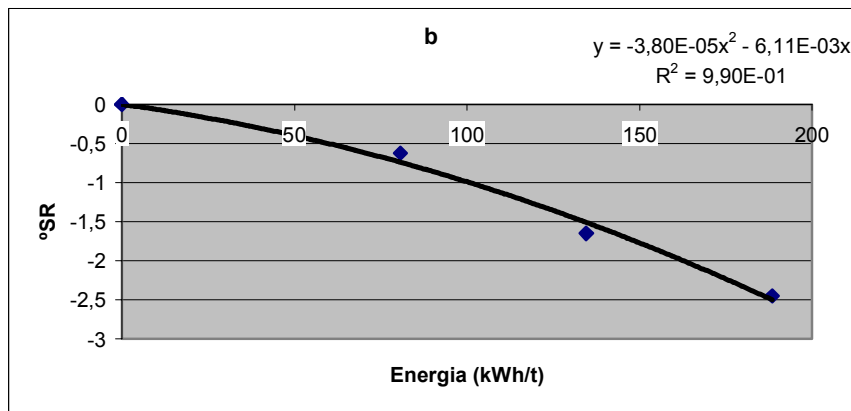
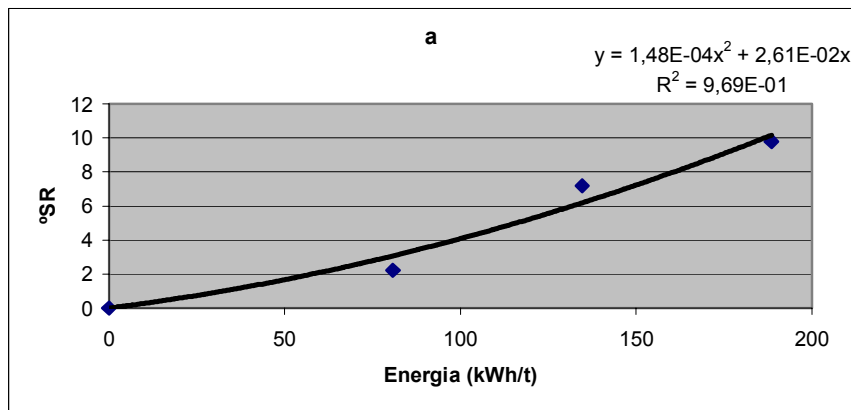
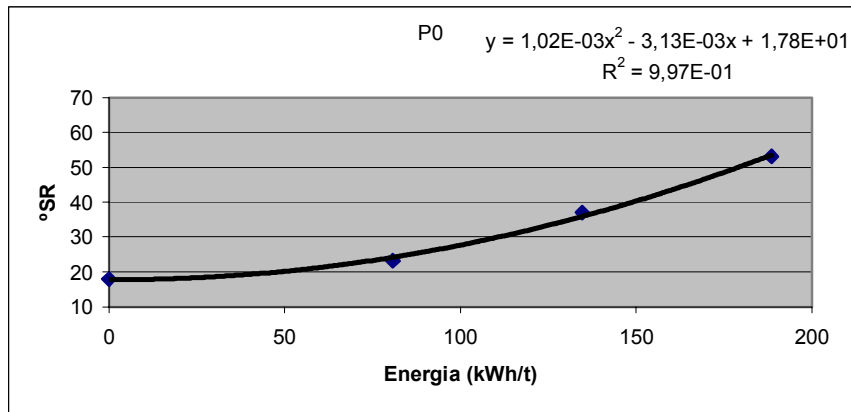




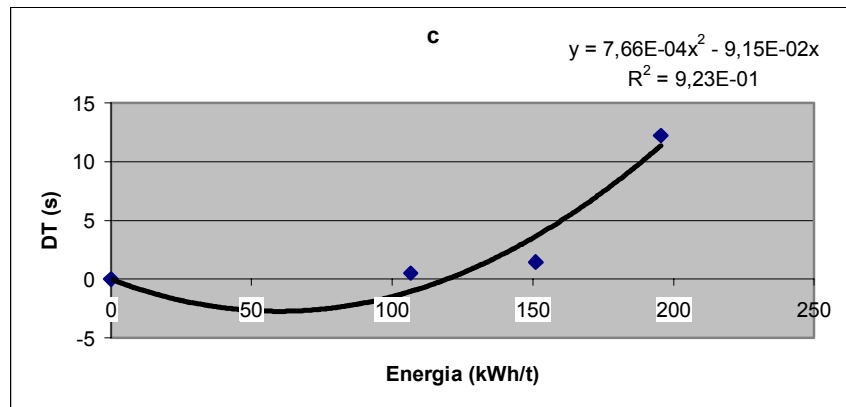
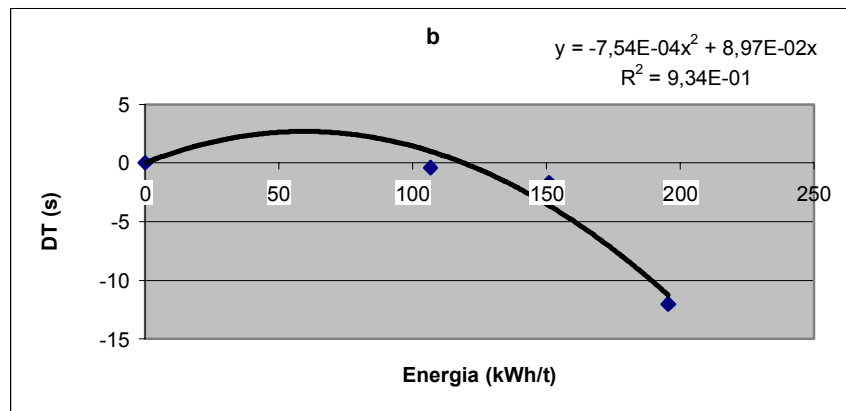
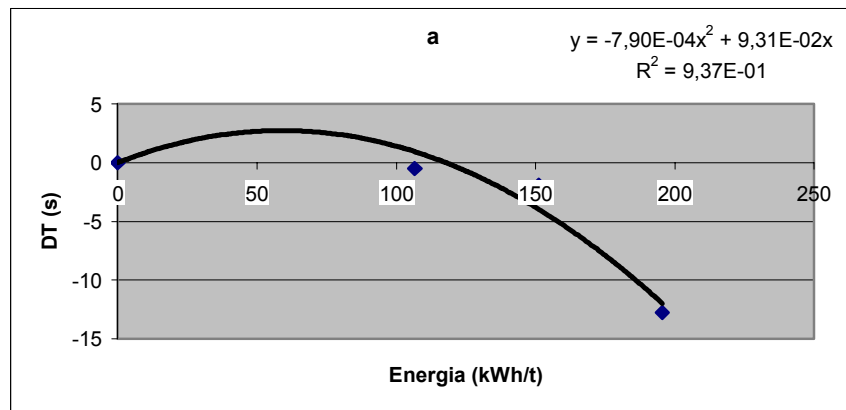
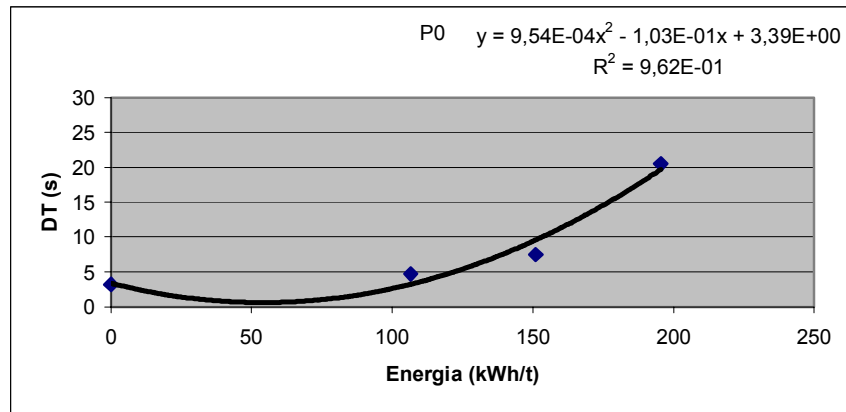
EUCALIPTO – SR



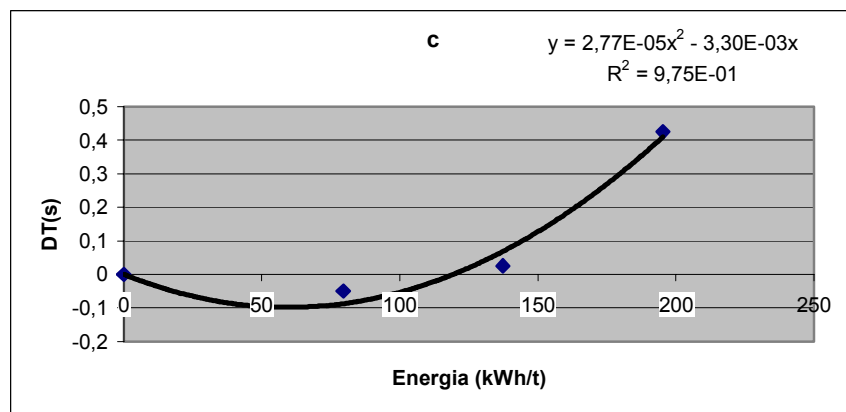
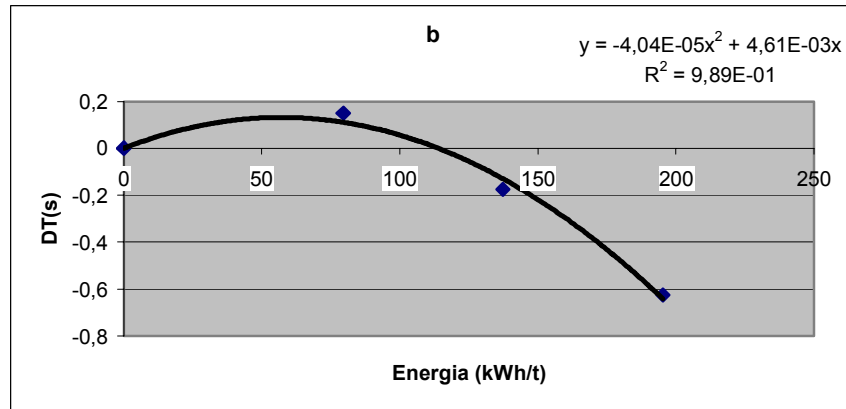
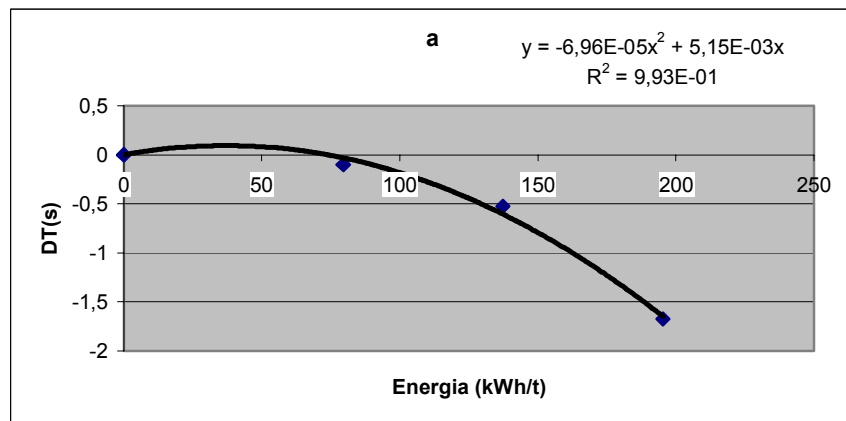
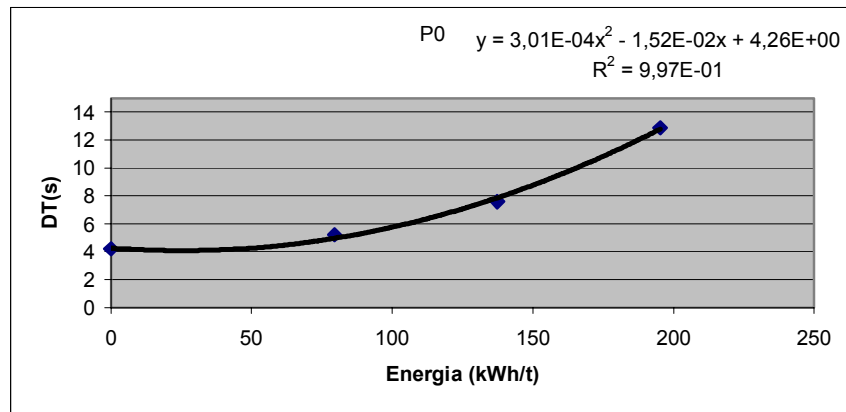
BÉTULA – SR



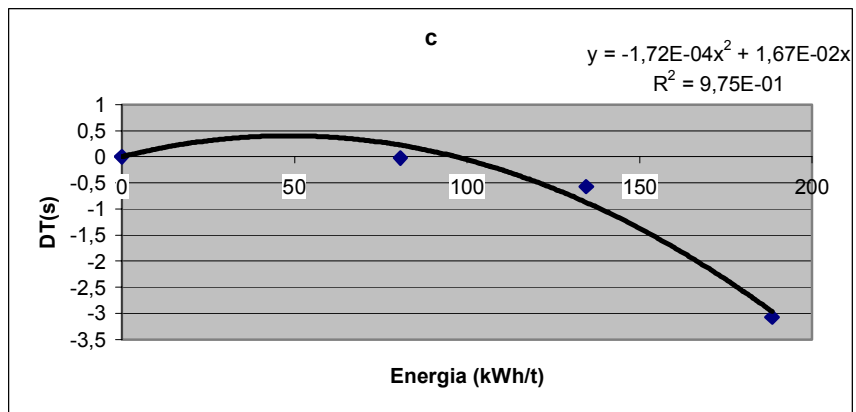
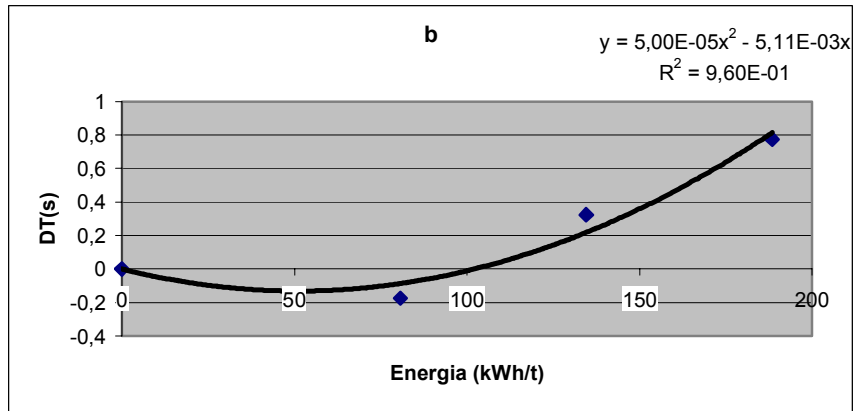
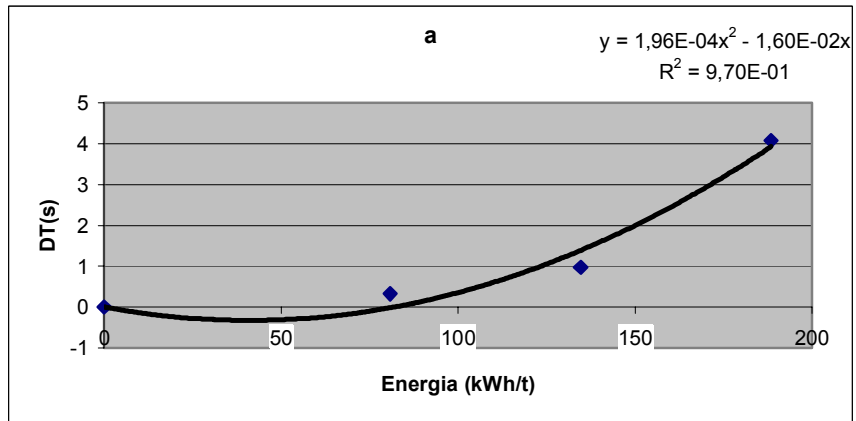
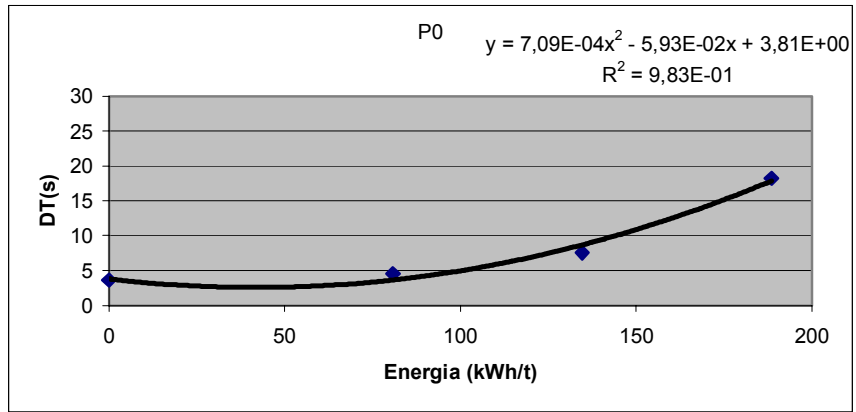
PINHO – DT



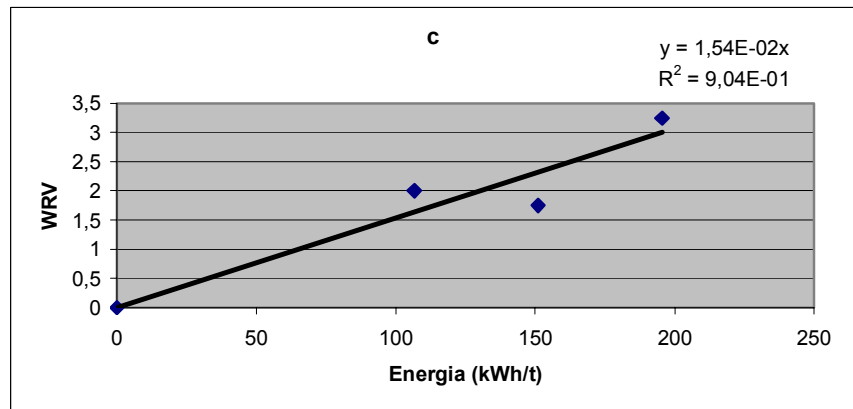
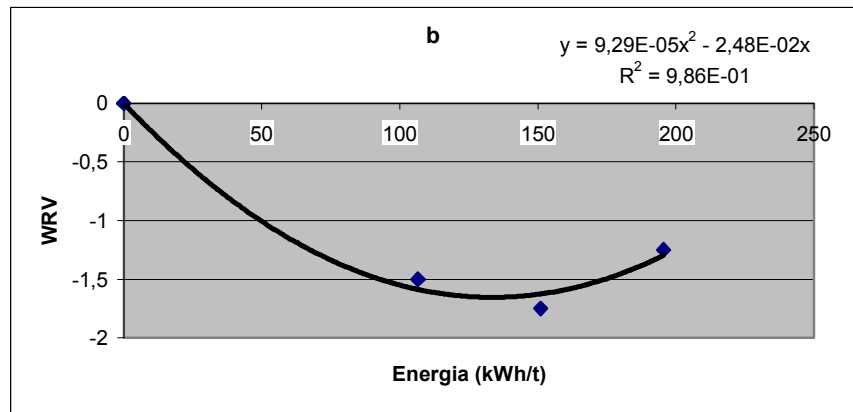
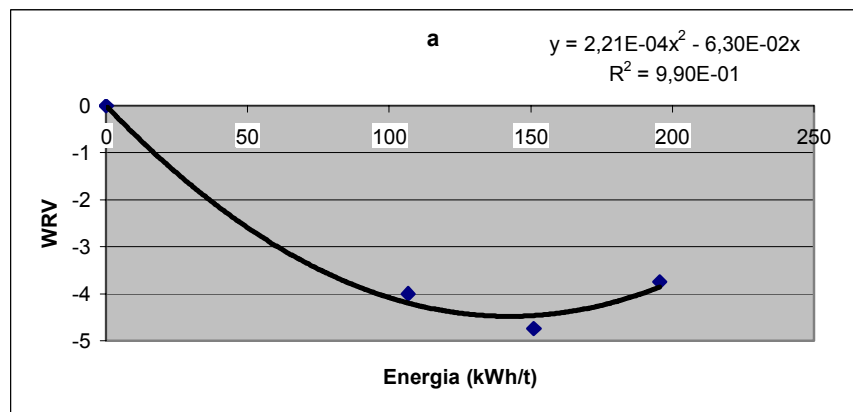
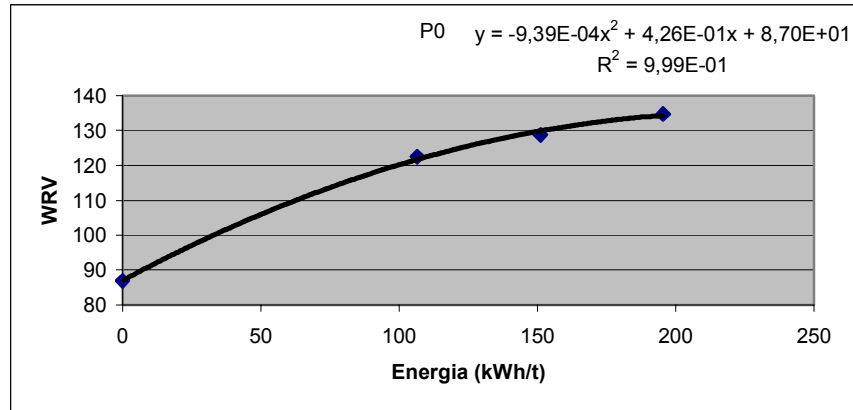
EUCALIPTO – DT



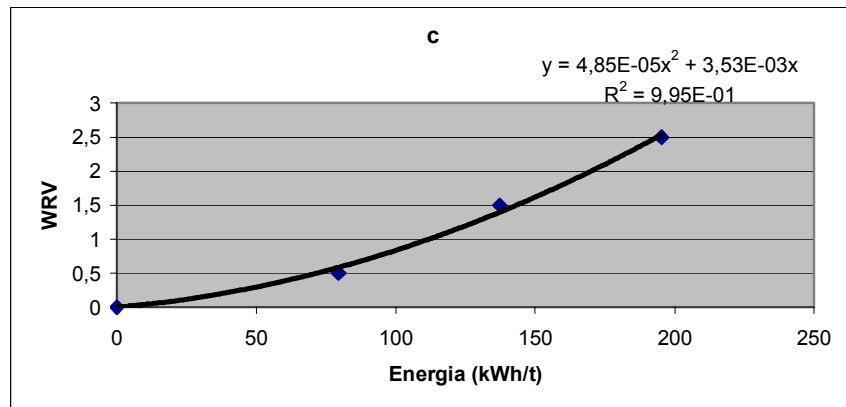
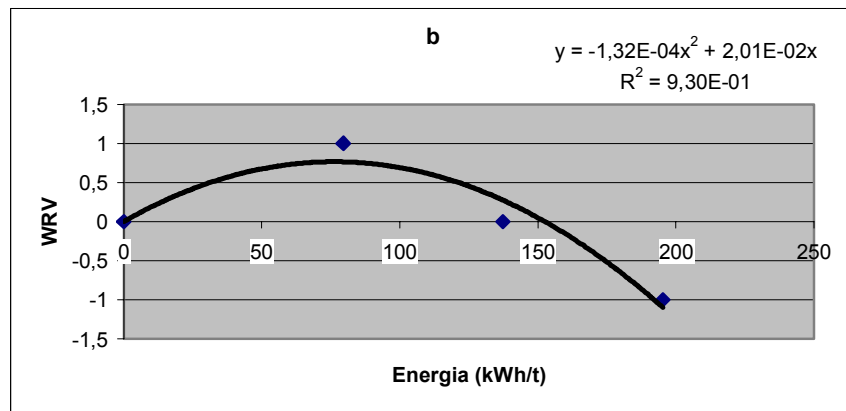
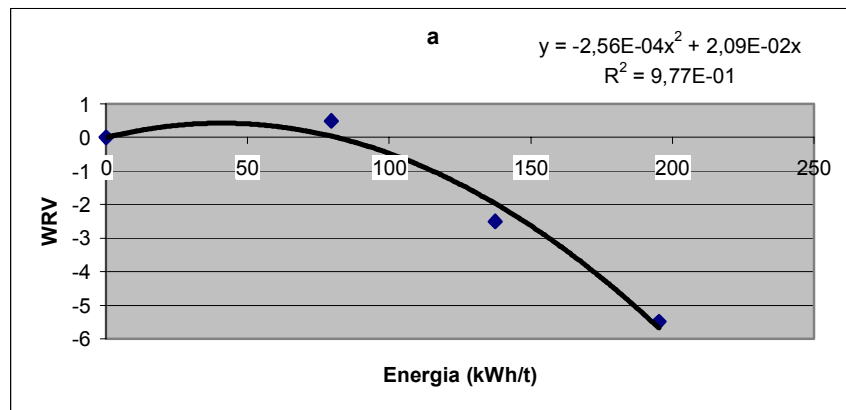
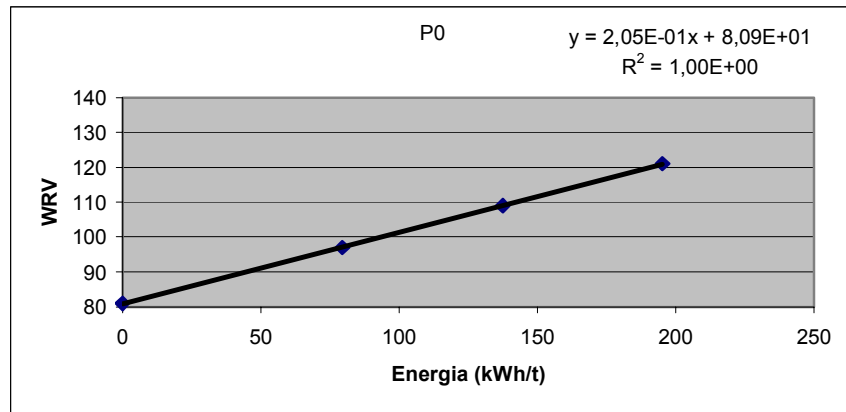
BÉTULA – DT



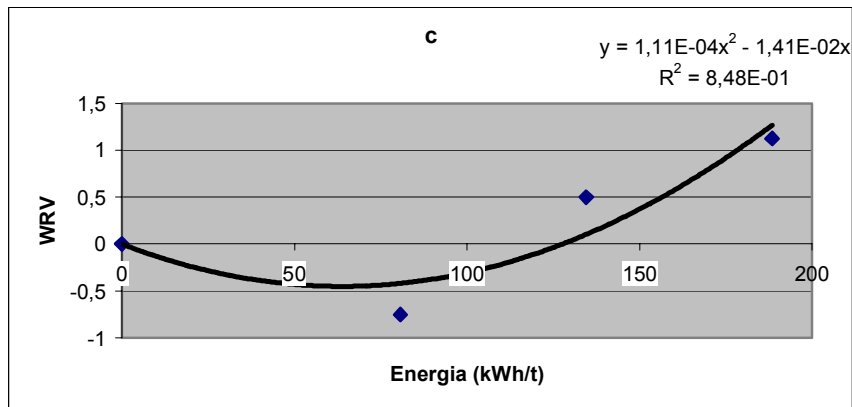
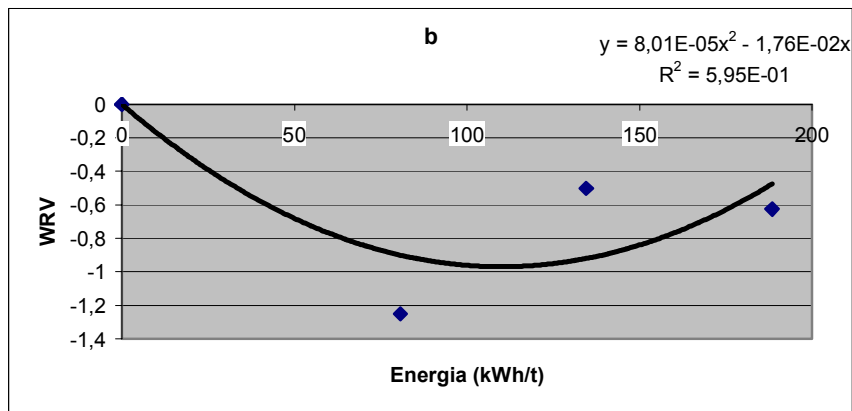
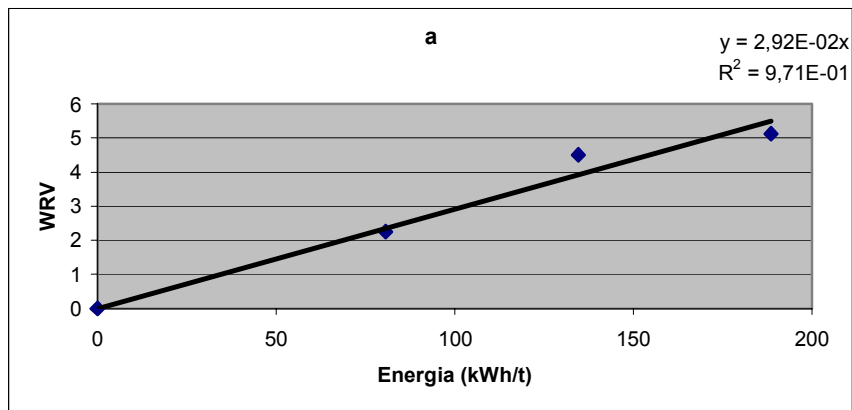
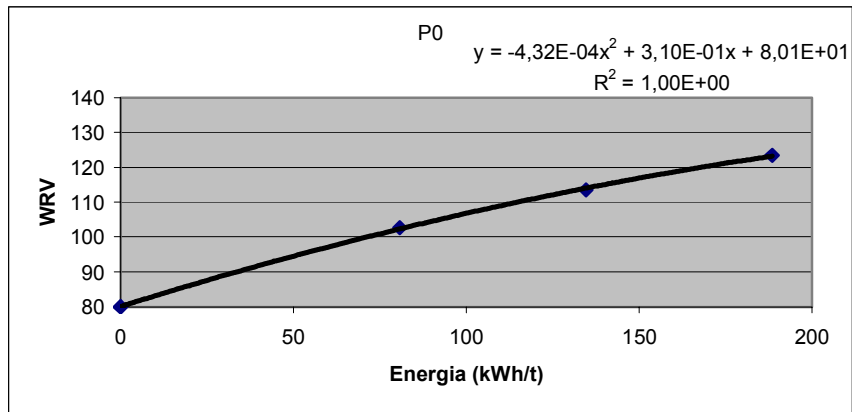
PINHO – WRV



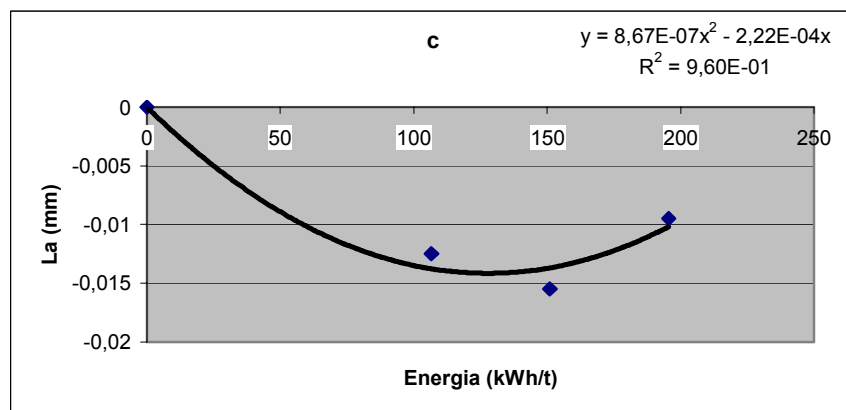
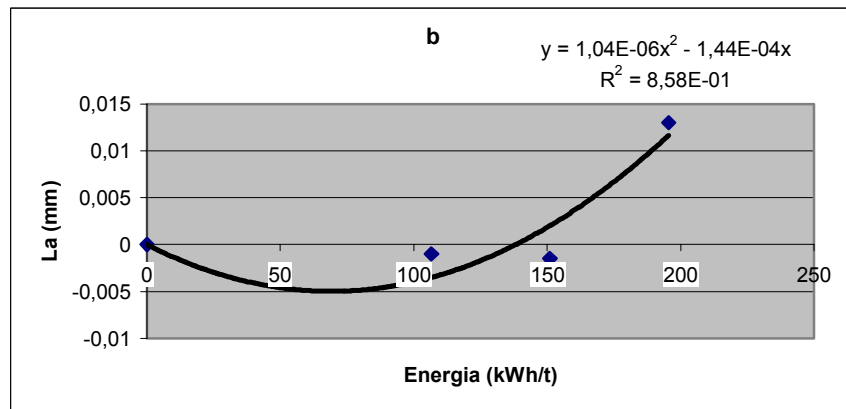
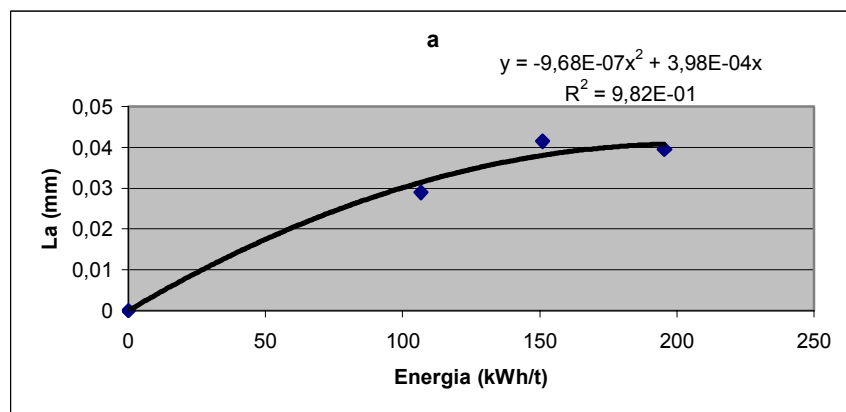
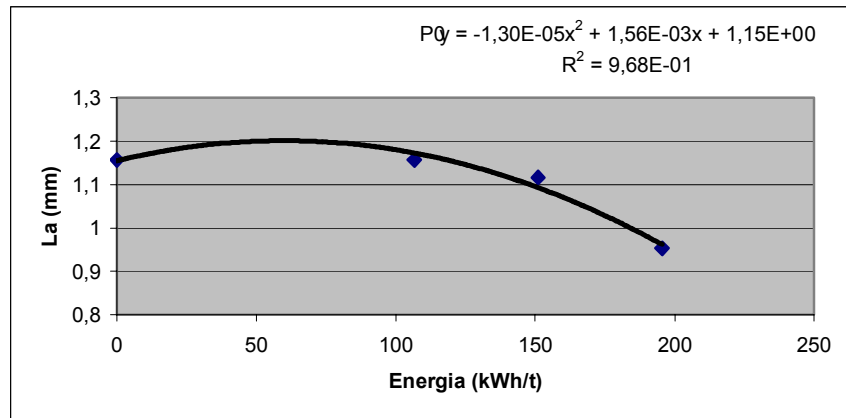
EUCALIPTO – WRV



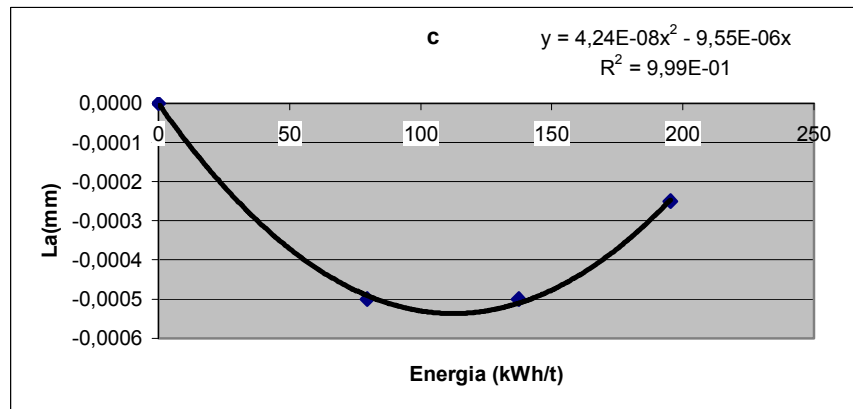
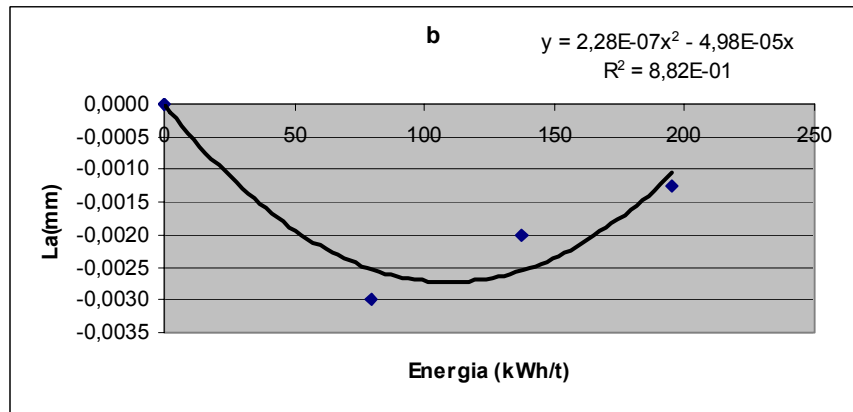
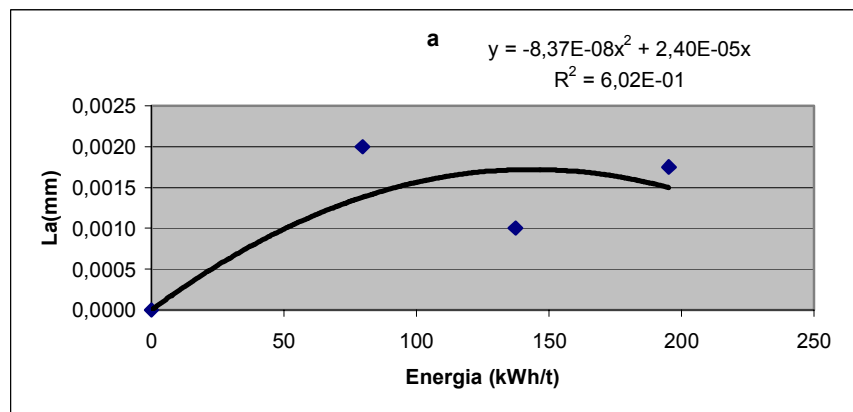
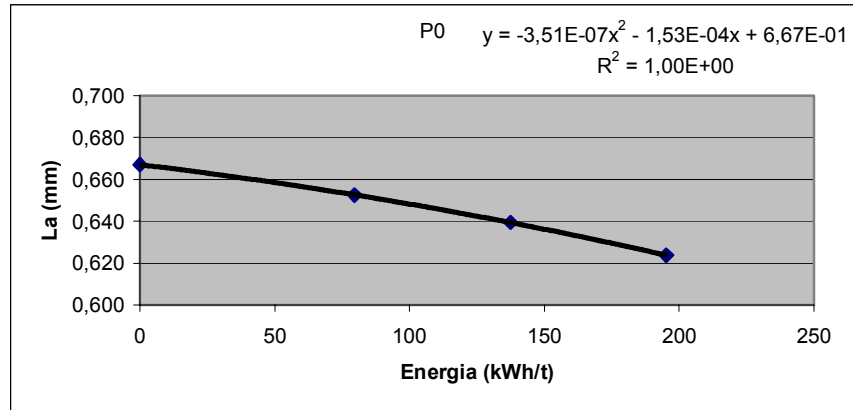
BÉTULA – WRV



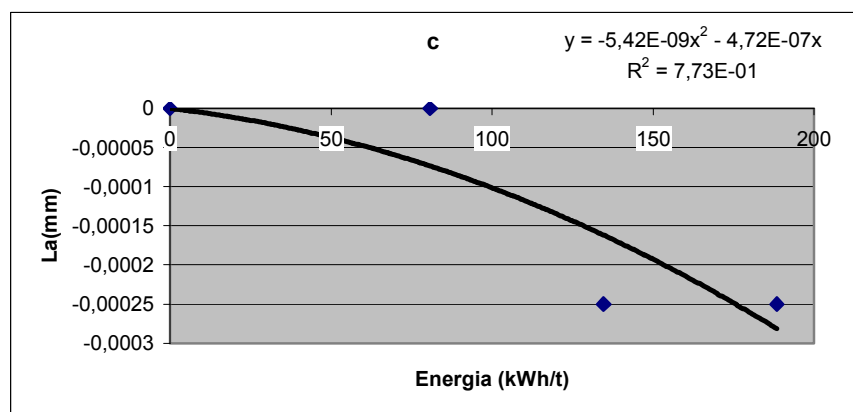
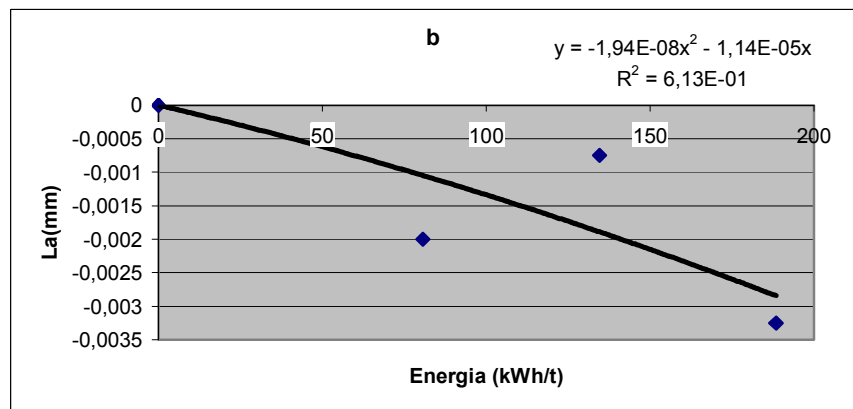
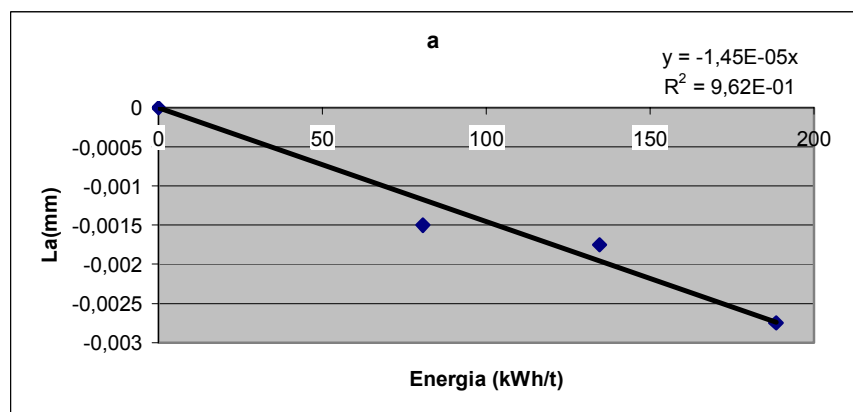
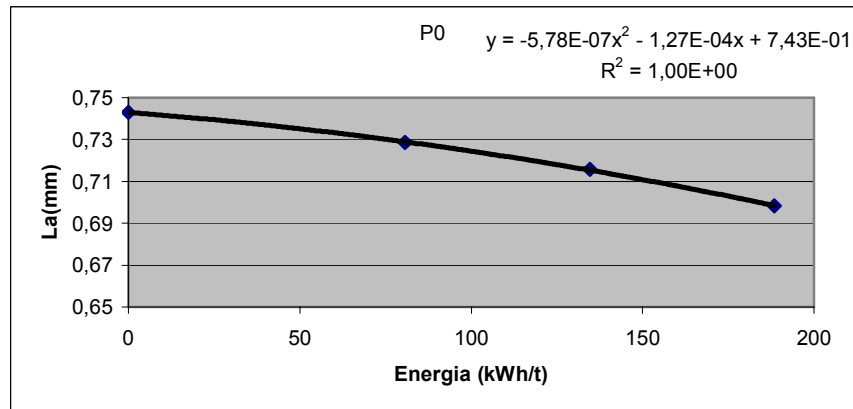
PINHO – Comprimento Aritmético da Fibra



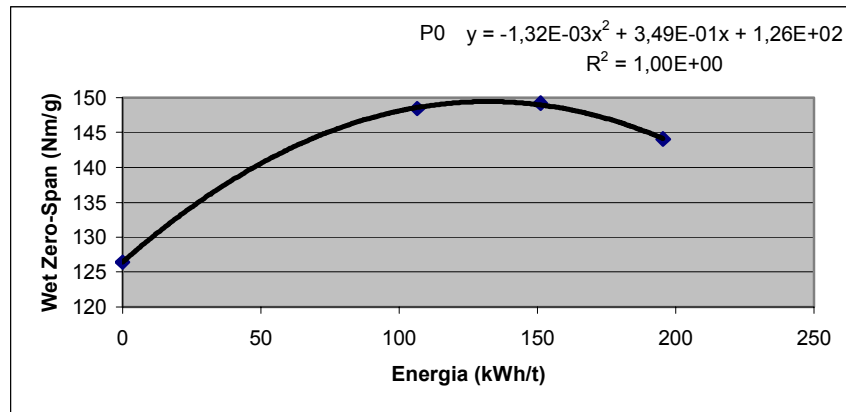
EUCALIPTO – Comprimento Aritmético da Fibra



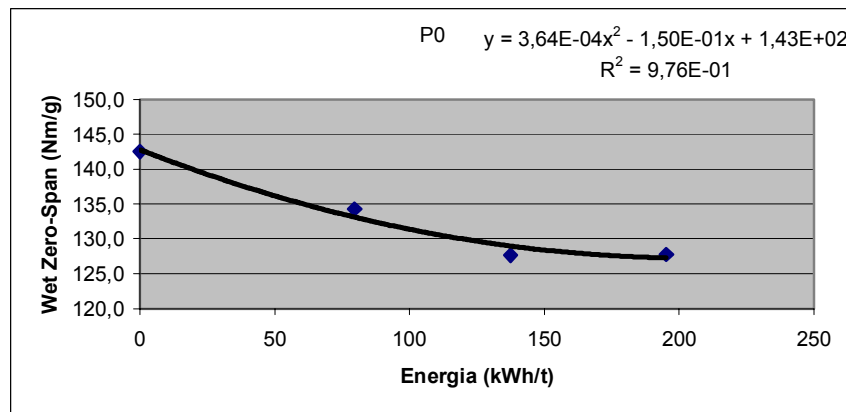
BÉTULA – Comprimento Aritmético da Fibra



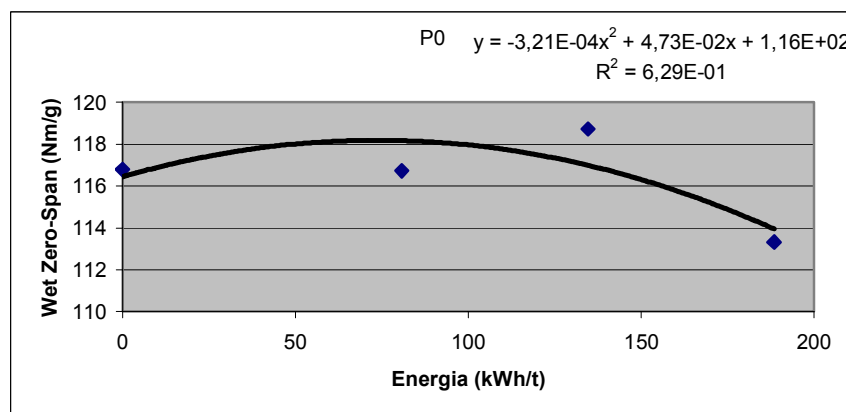
PINHO – Wet Zero-Span Tensile



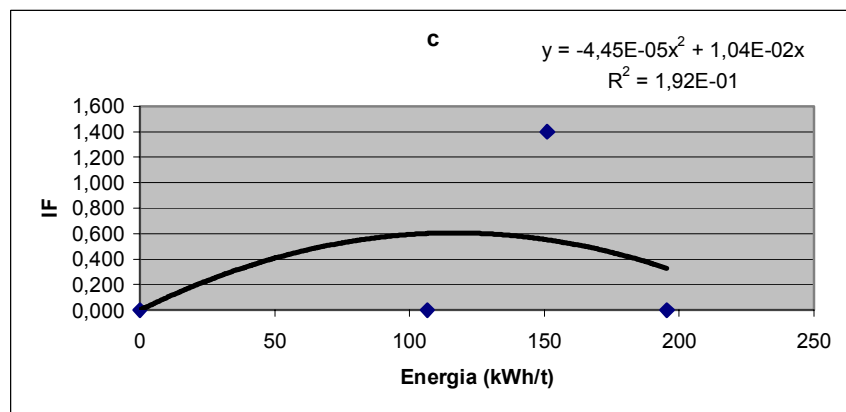
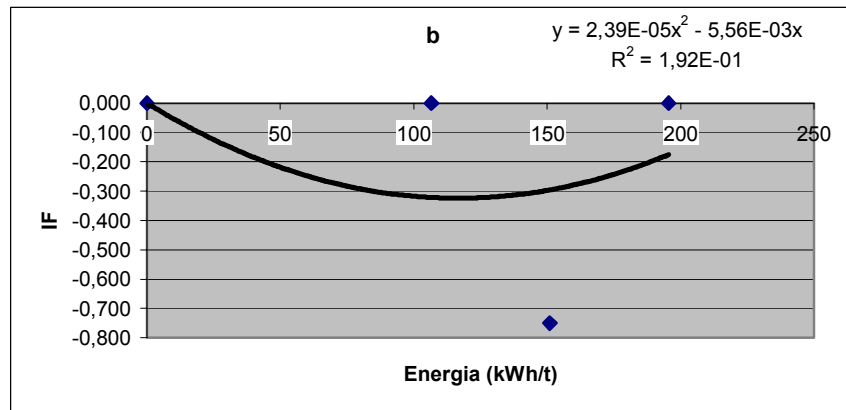
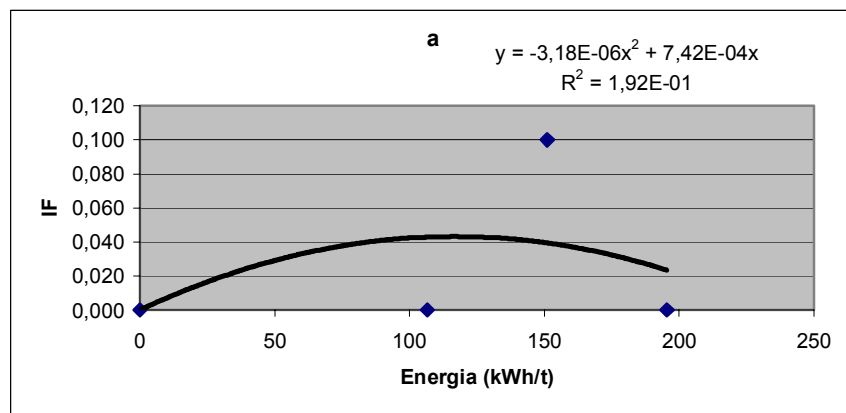
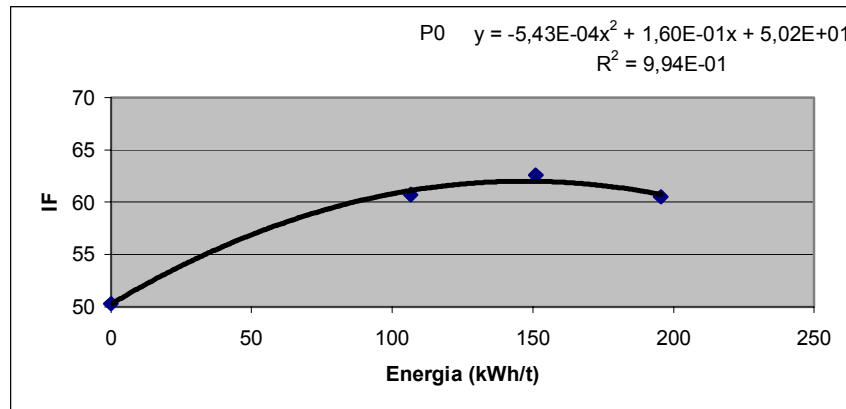
EUCALIPTO – Wet Zero-Span Tensile



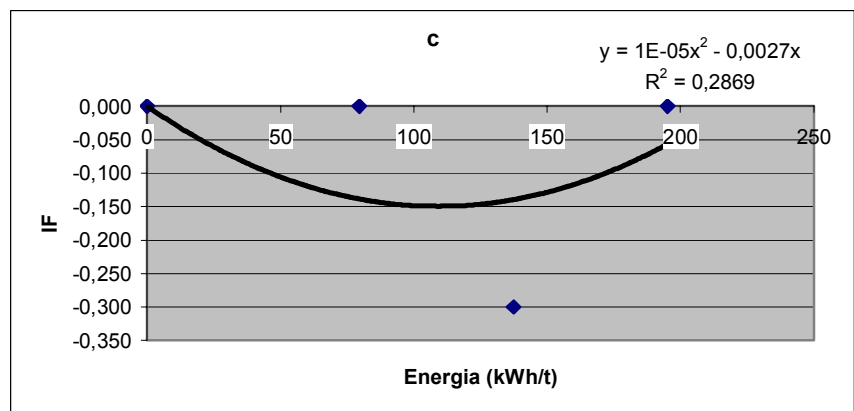
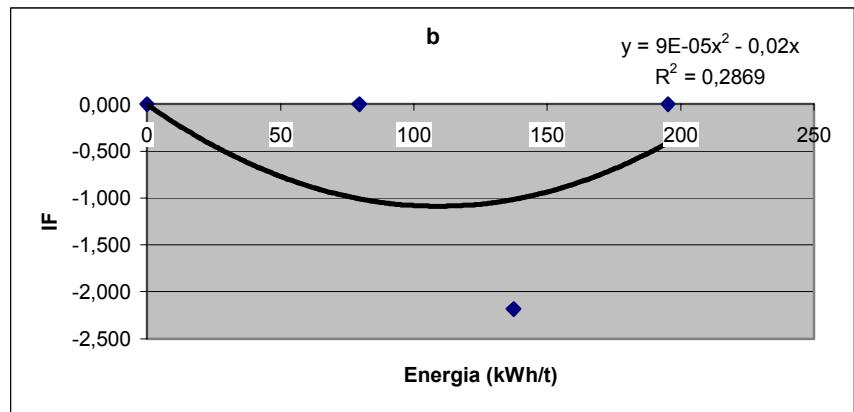
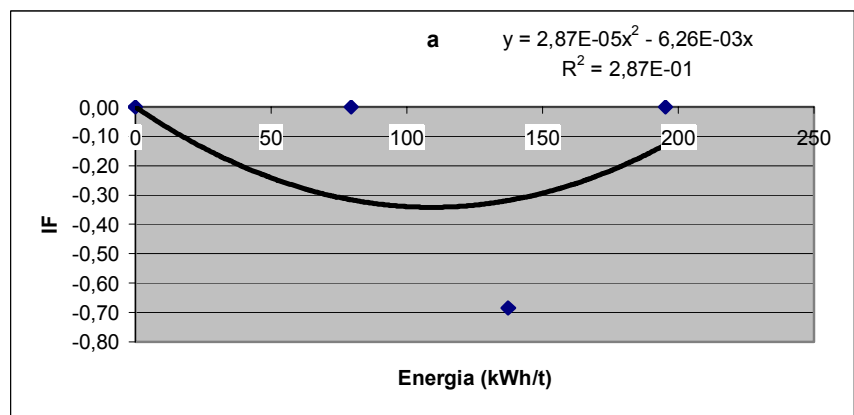
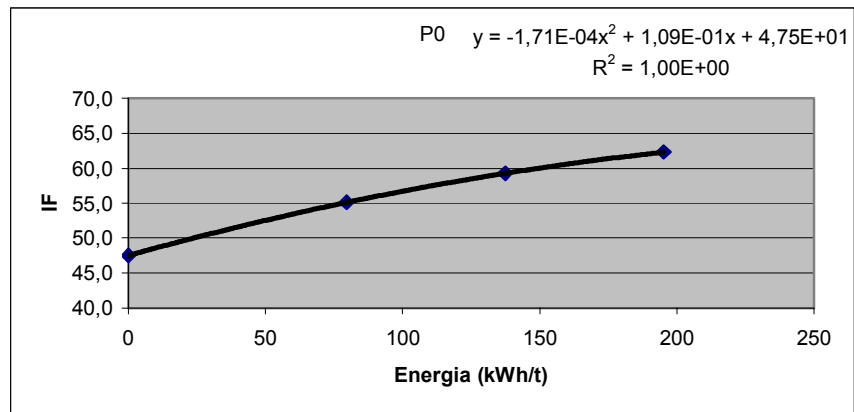
BÉTULA - Wet Zero-Span Tensile



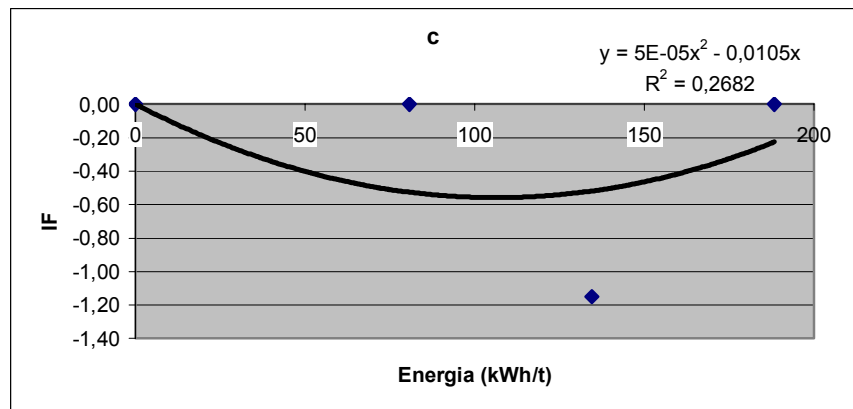
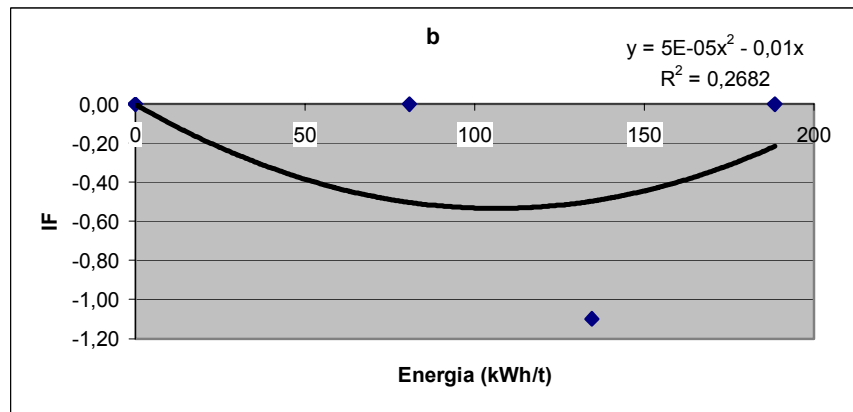
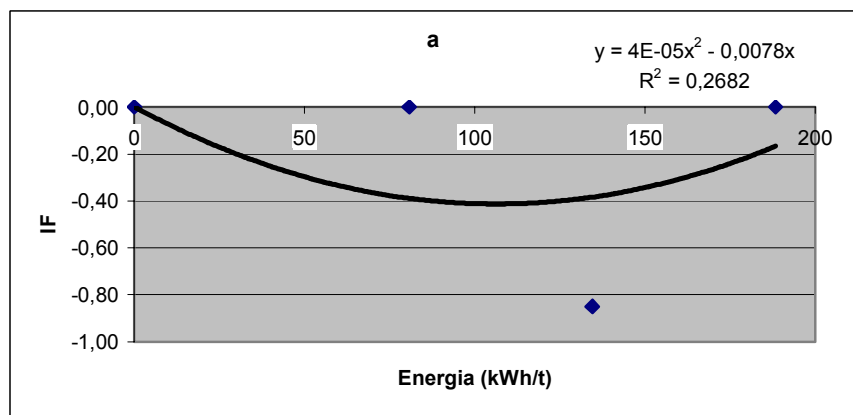
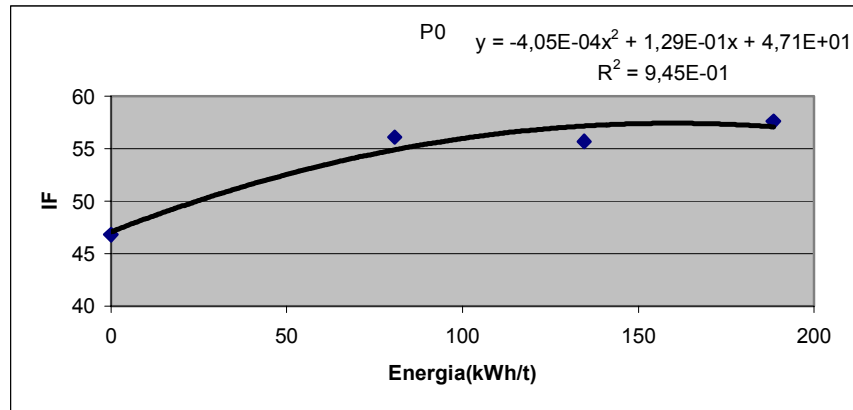
PINHO – Índice de Flexibilidade



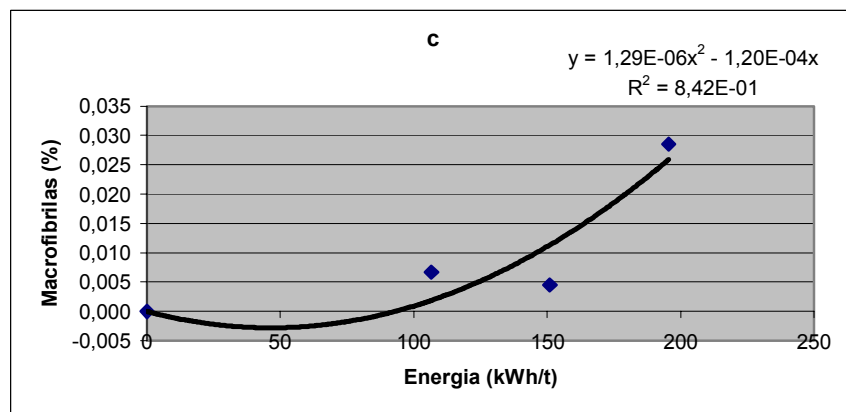
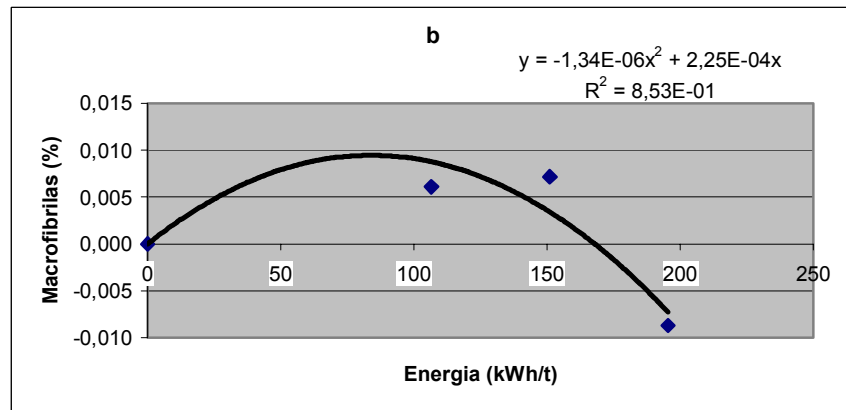
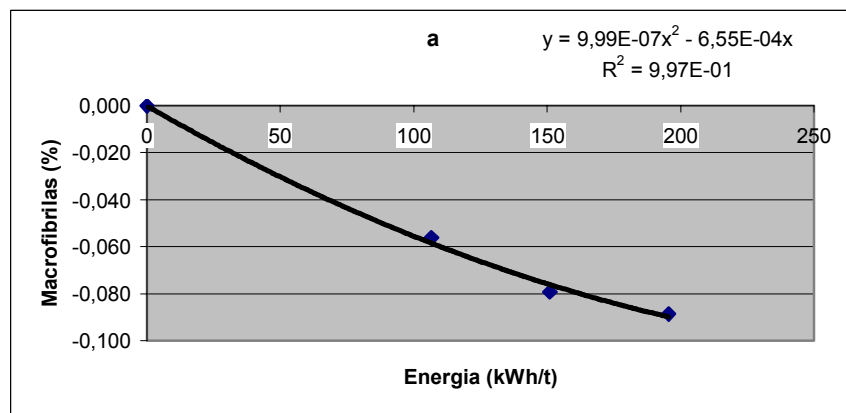
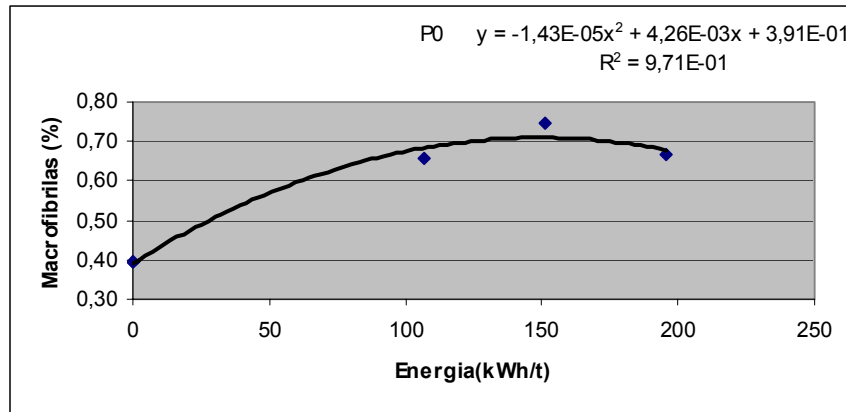
EUCALIPTO – Índice de Flexibilidade



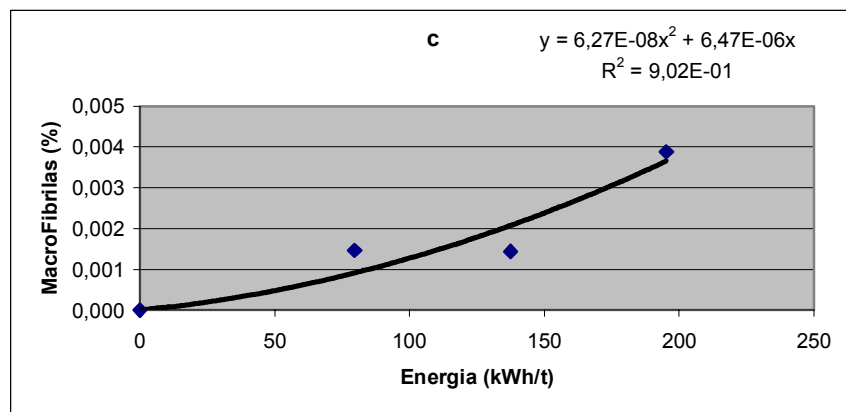
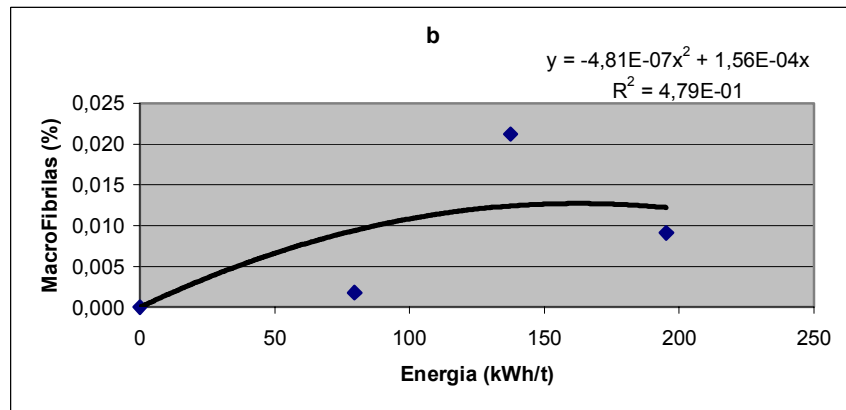
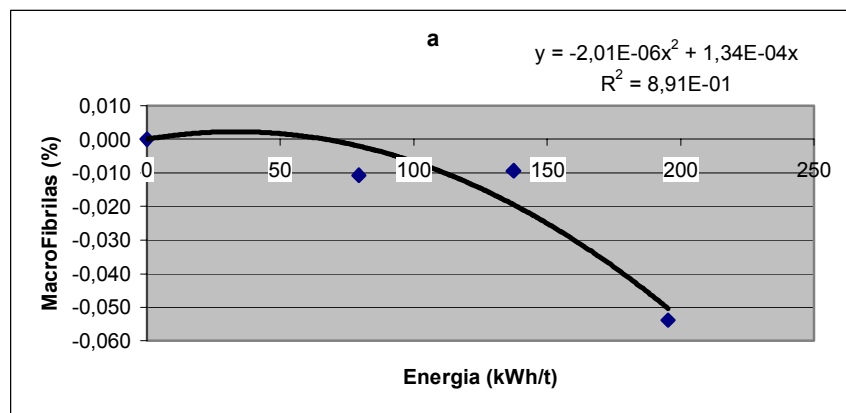
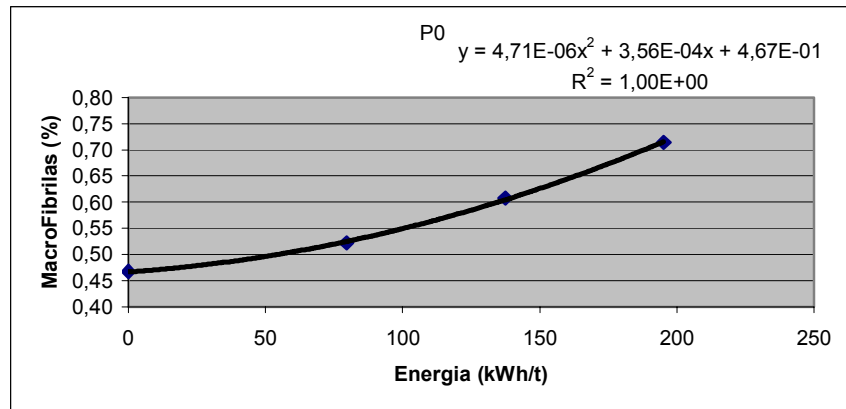
BÉTULA - Índice de Flexibilidade



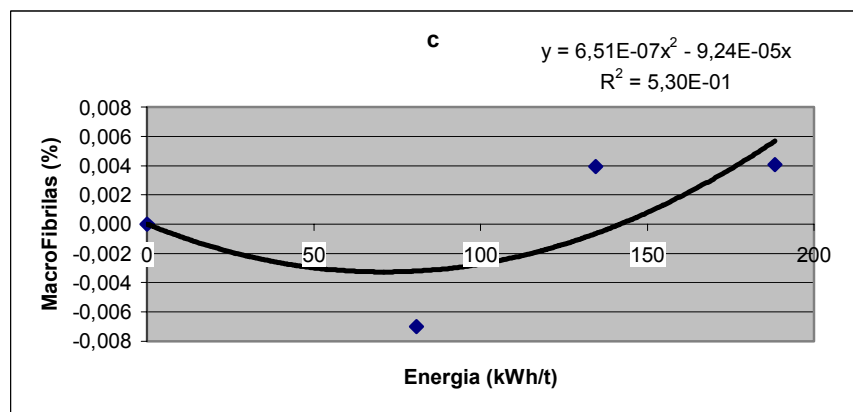
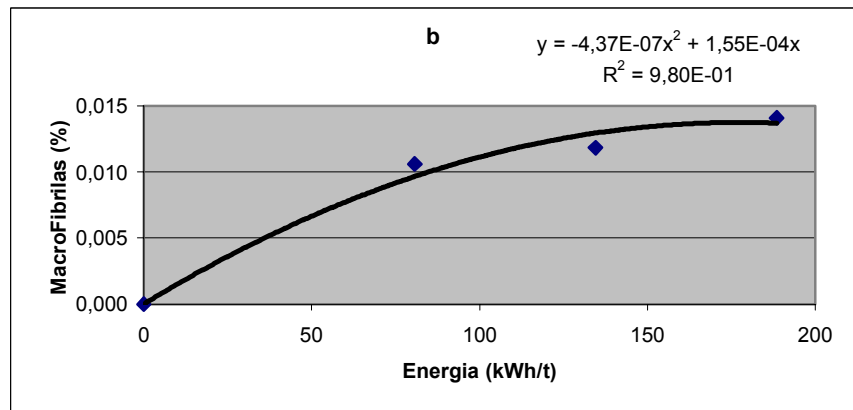
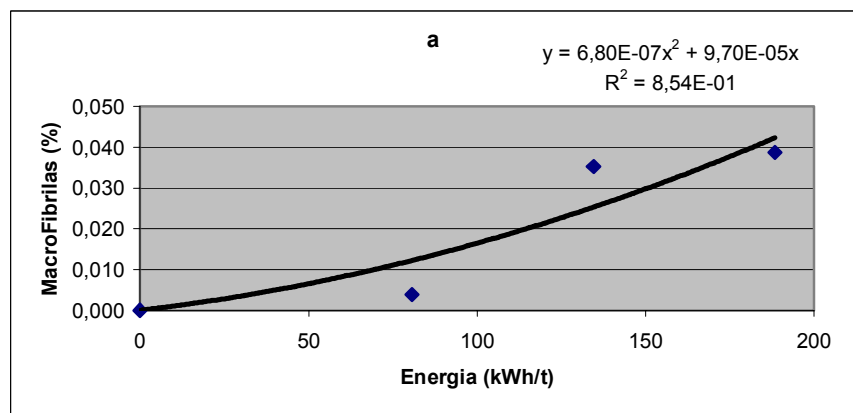
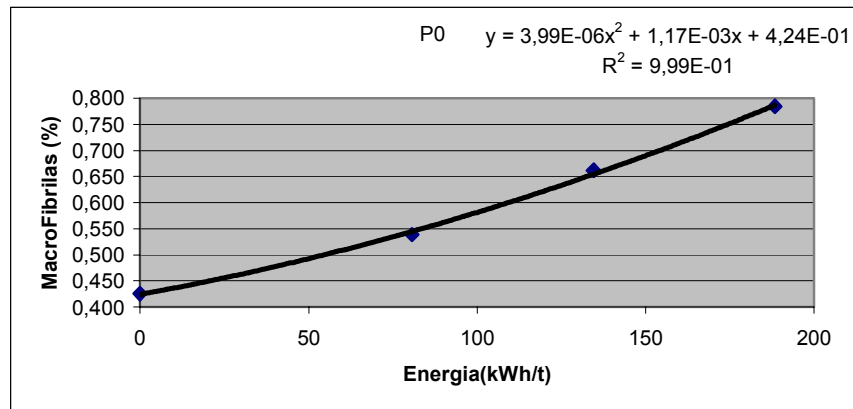
PINHO – Teor em Macrofibrilas



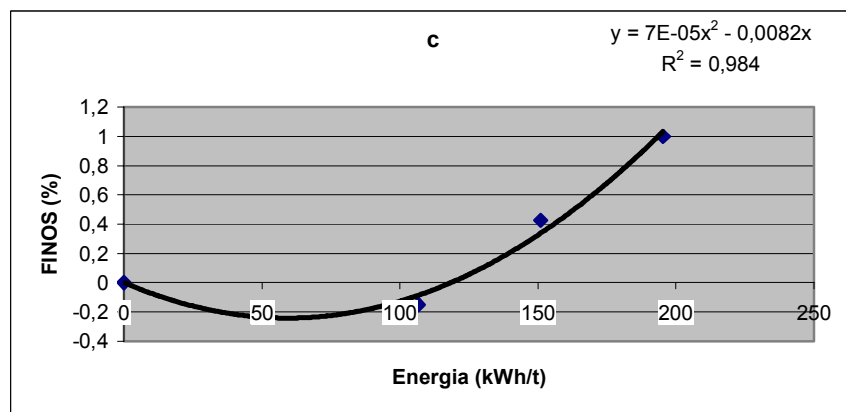
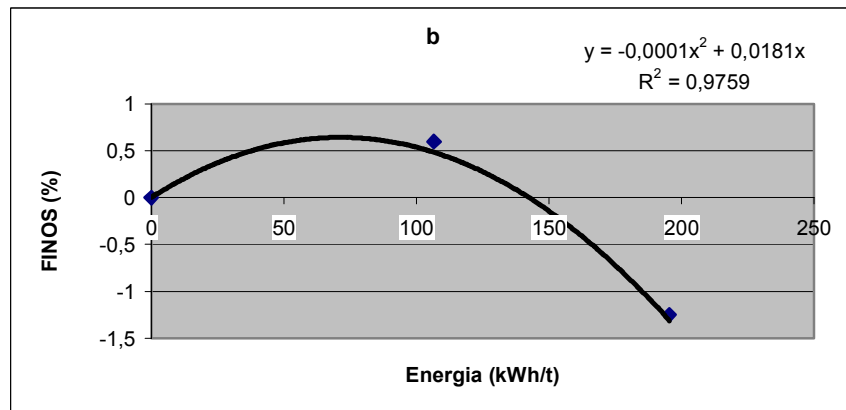
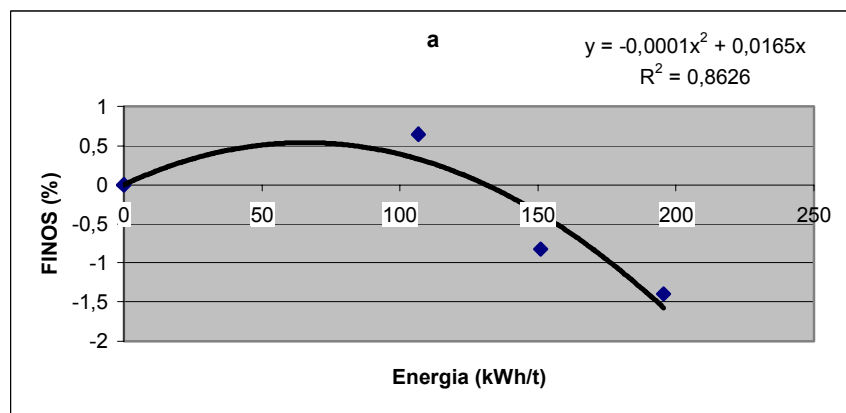
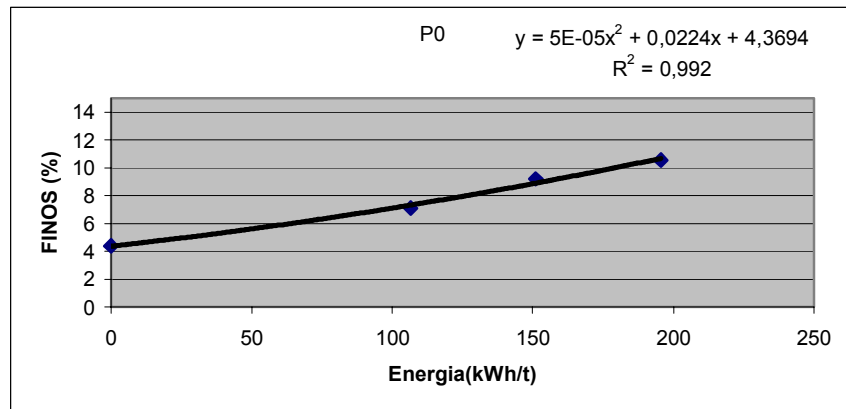
EUCALIPTO – Teor em Macrofibrilas



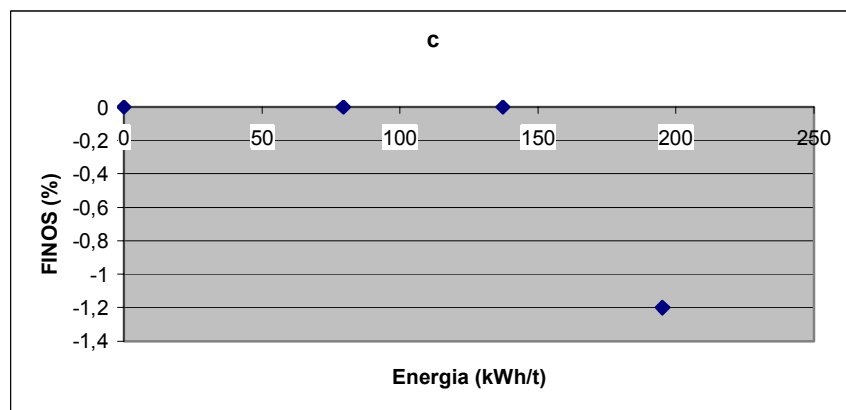
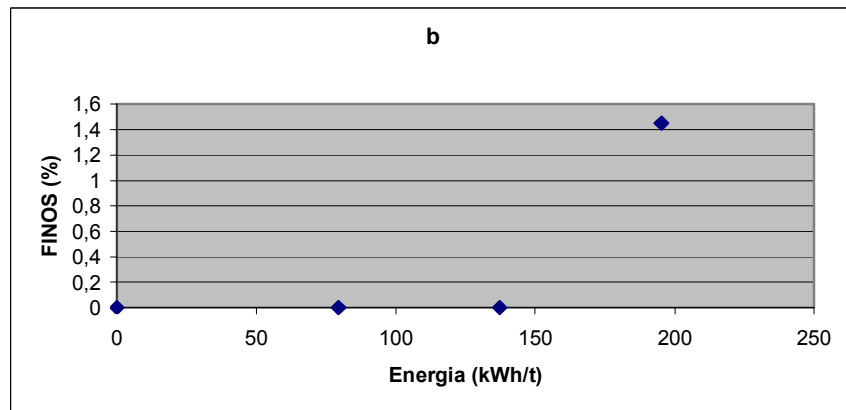
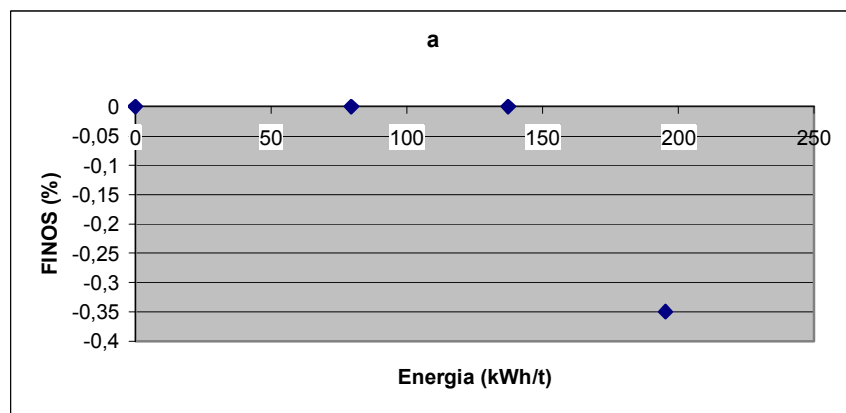
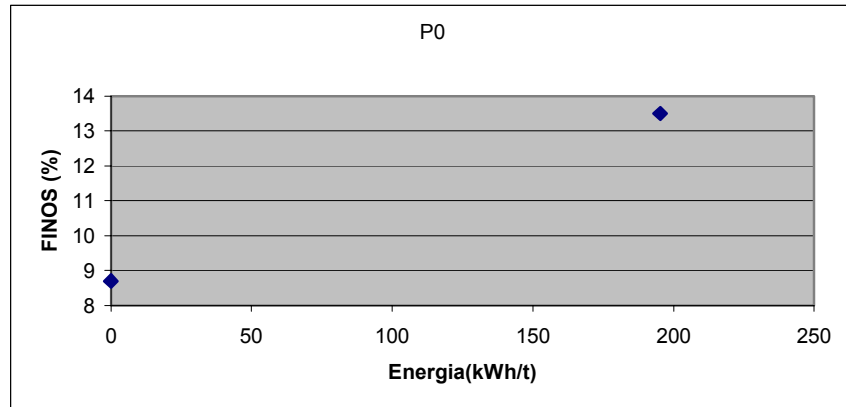
BÉTULA - Teor em Macrofibrilas



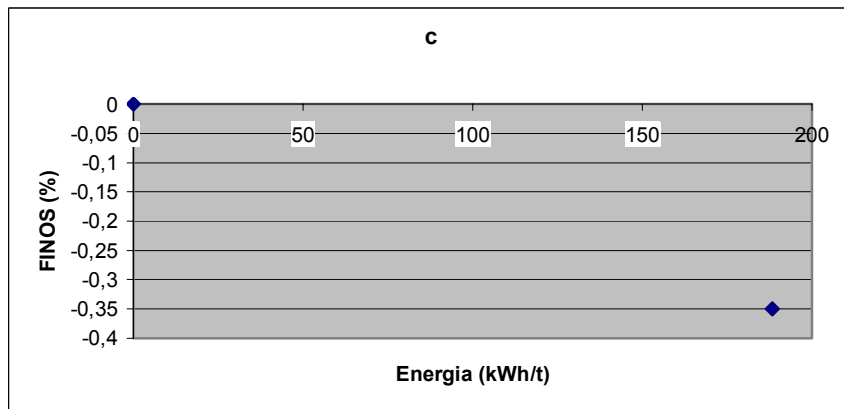
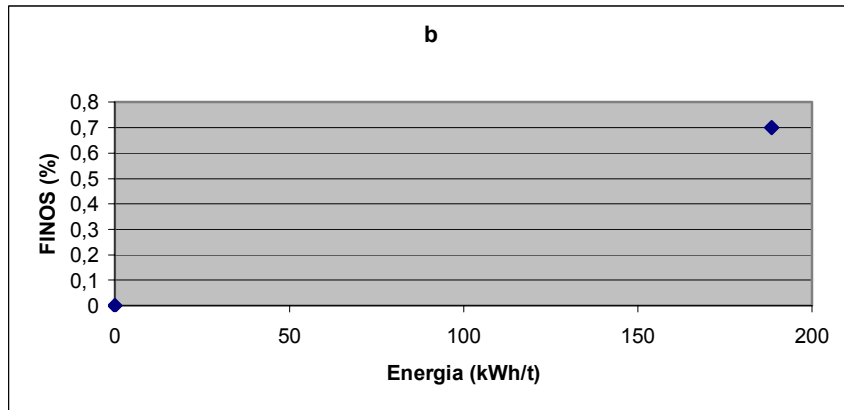
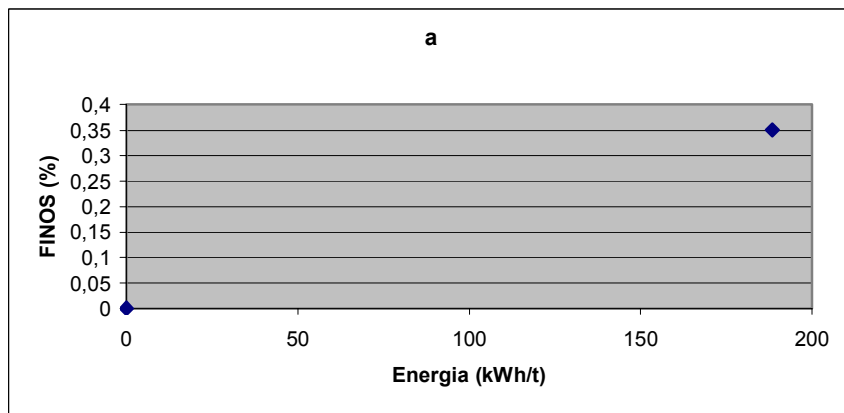
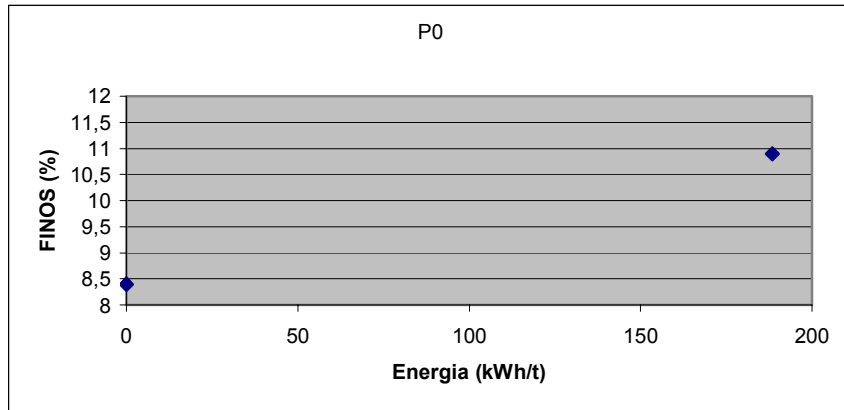
PINHO – Taxa de Finos Bauer-McNett



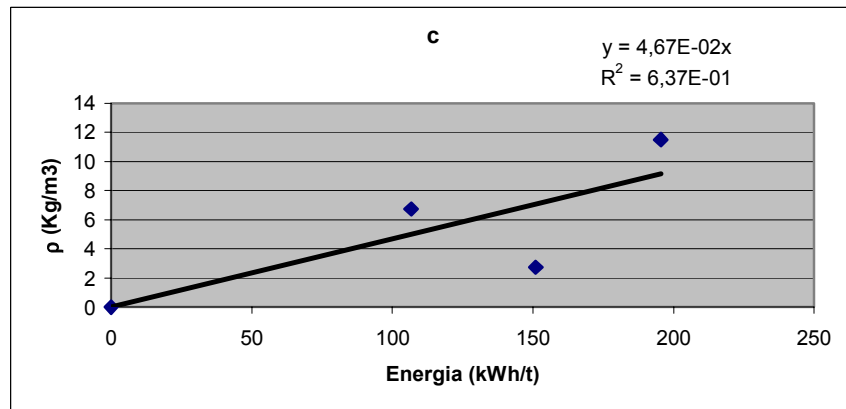
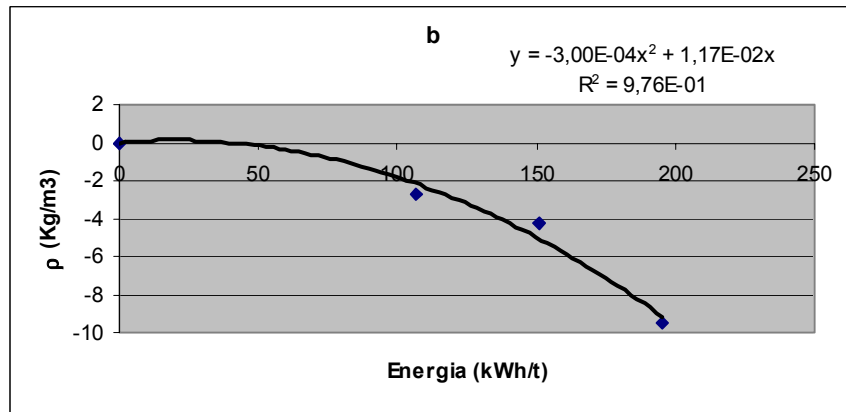
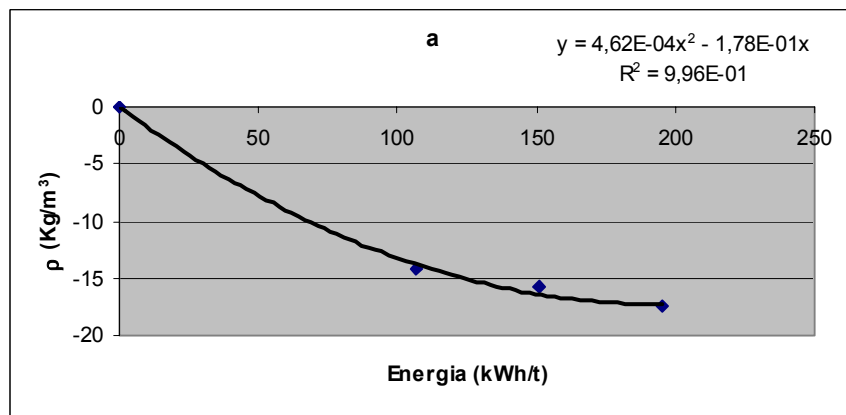
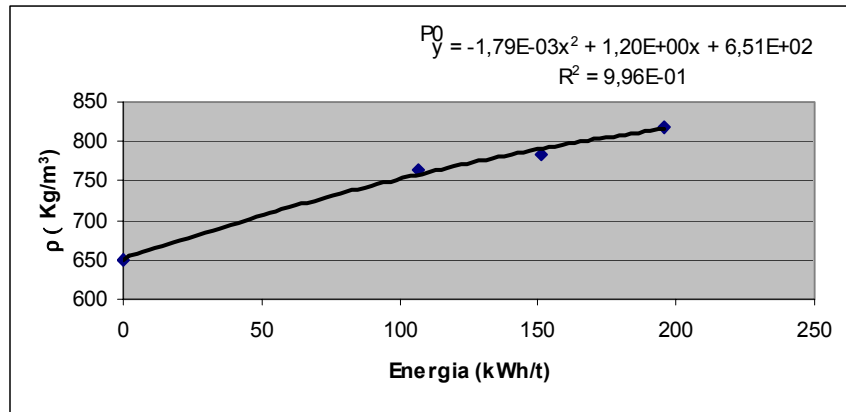
EUCALIPTO – Taxa de Finos Bauer-McNett



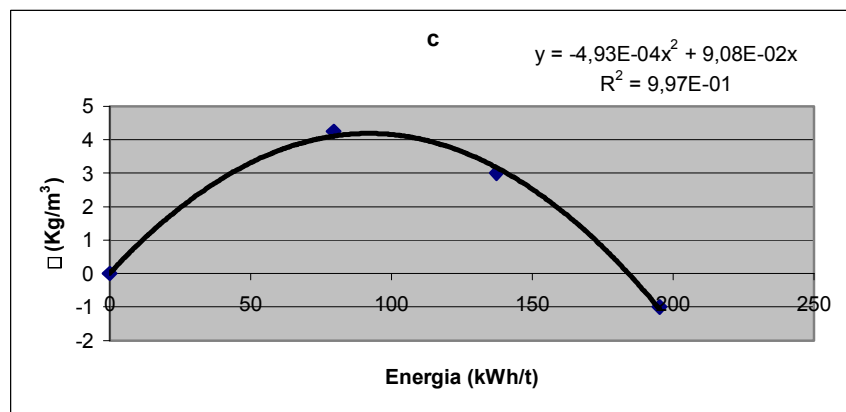
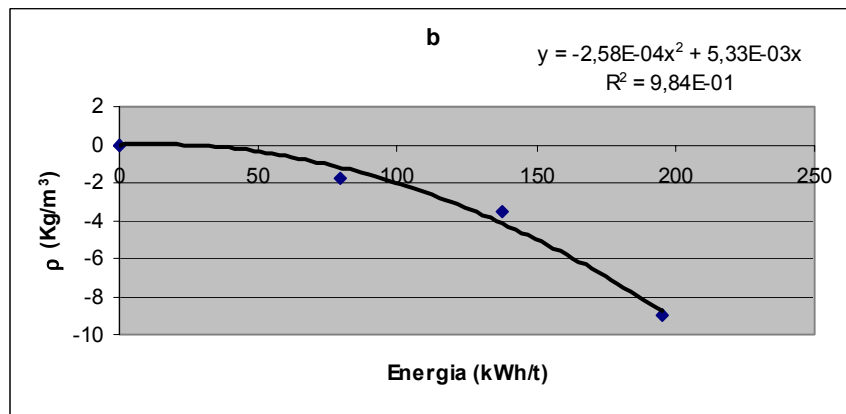
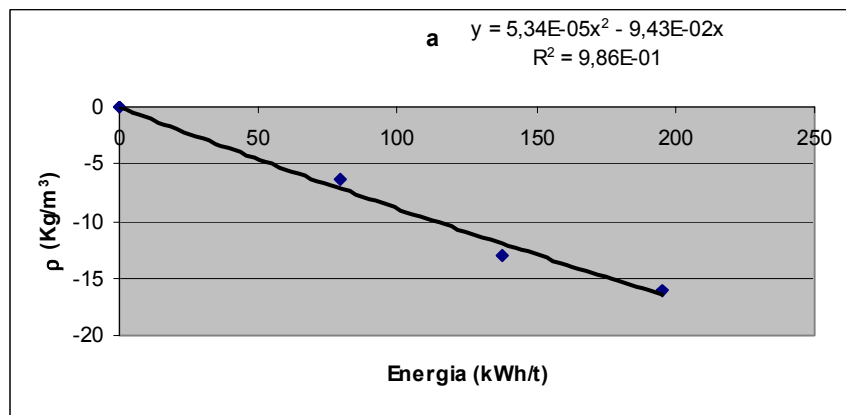
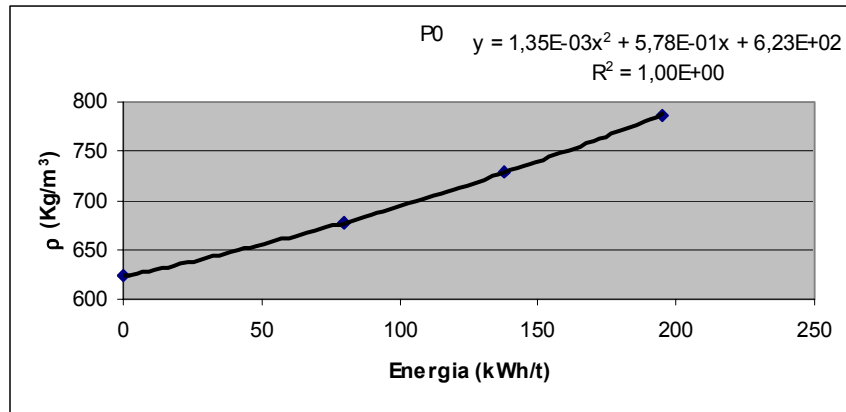
BÉTULA - Taxa de Finos Bauer-McNett



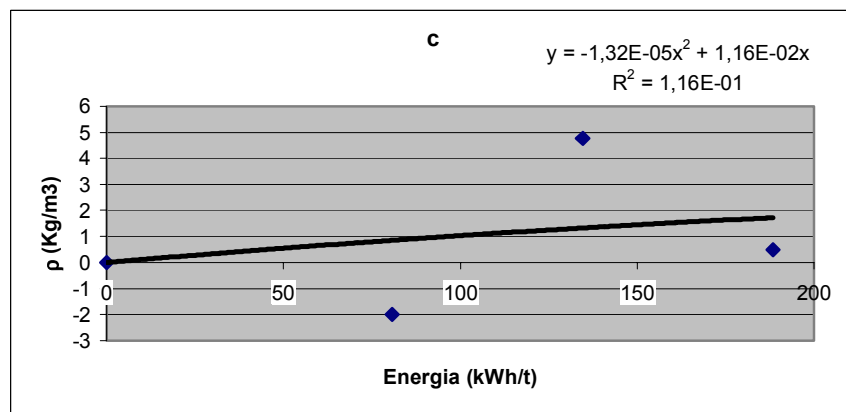
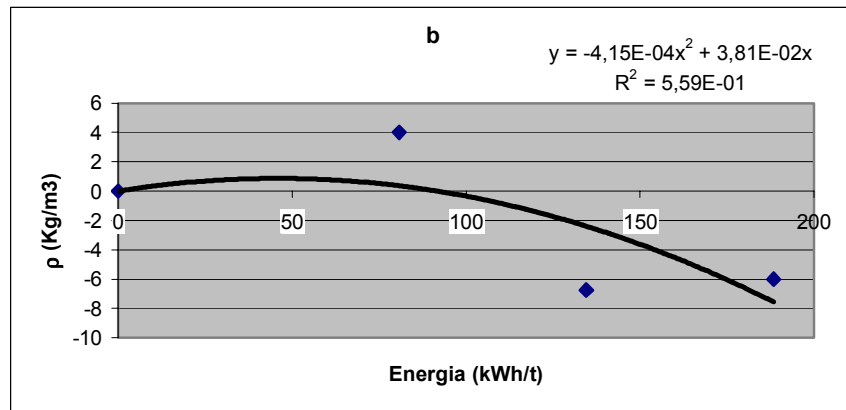
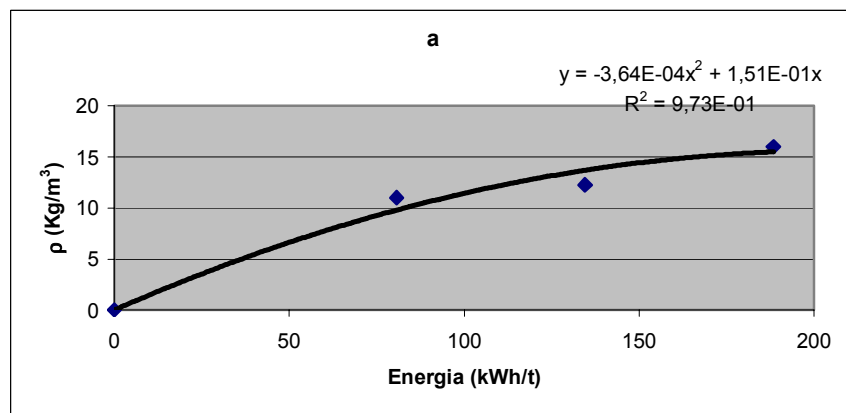
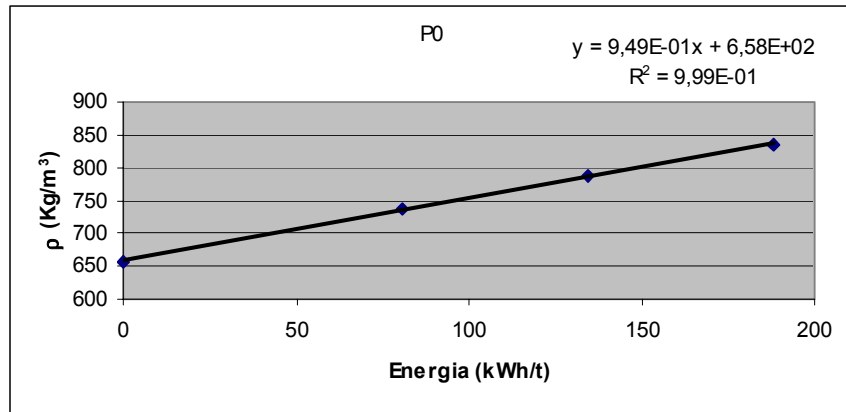
PINHO – Massa Volúmica



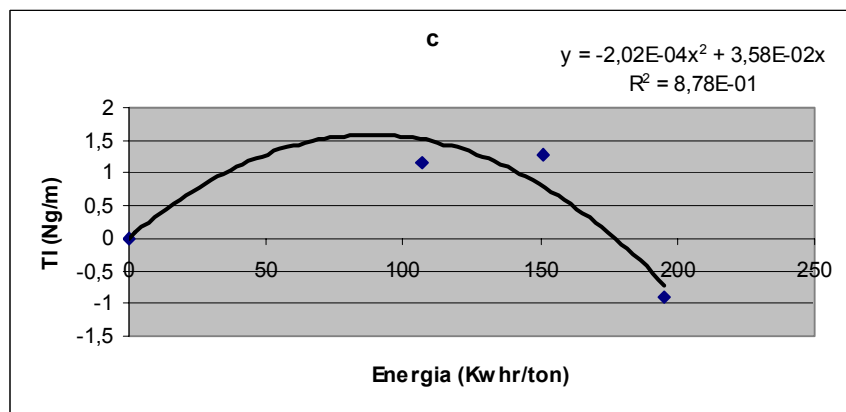
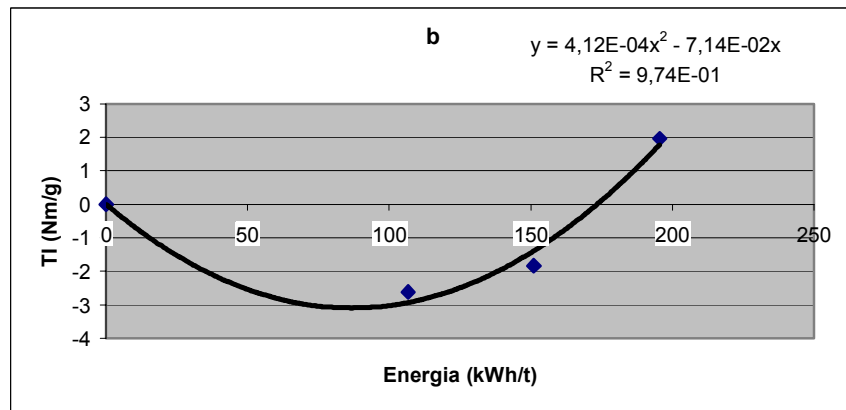
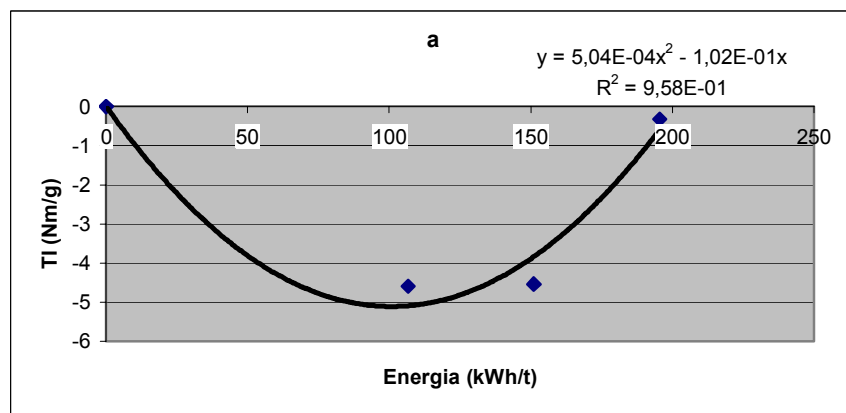
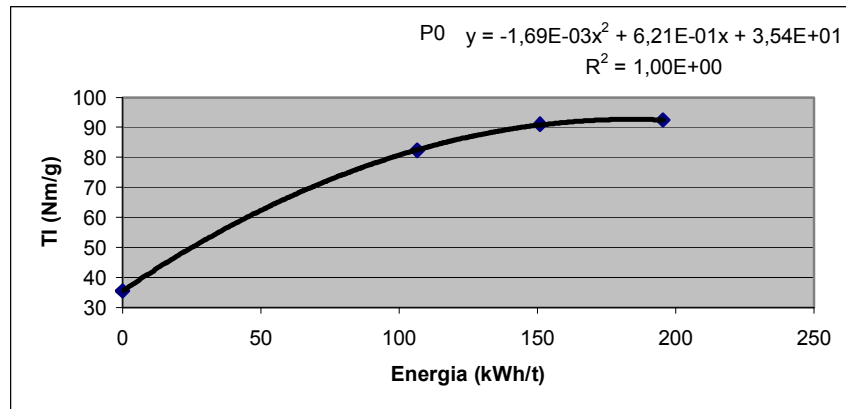
EUCALIPTO – Massa Volúmica



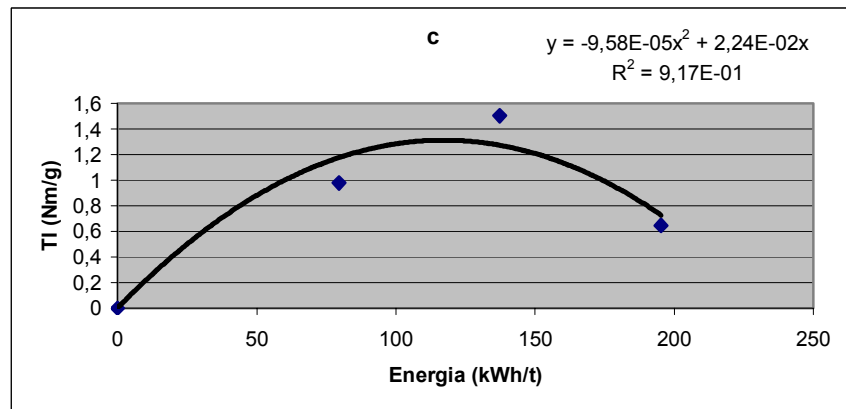
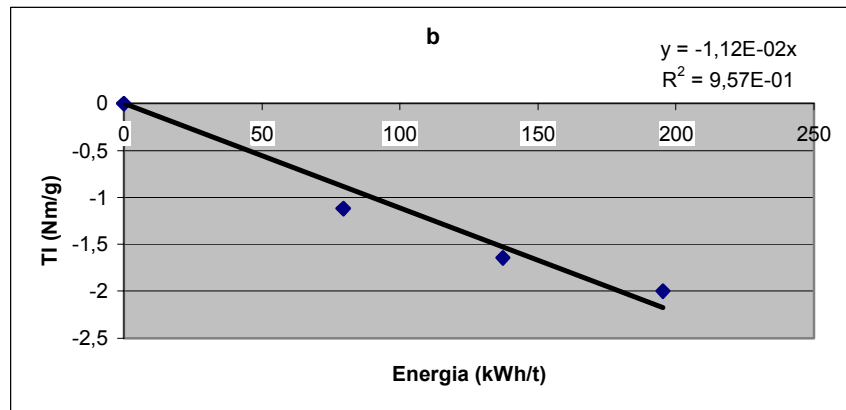
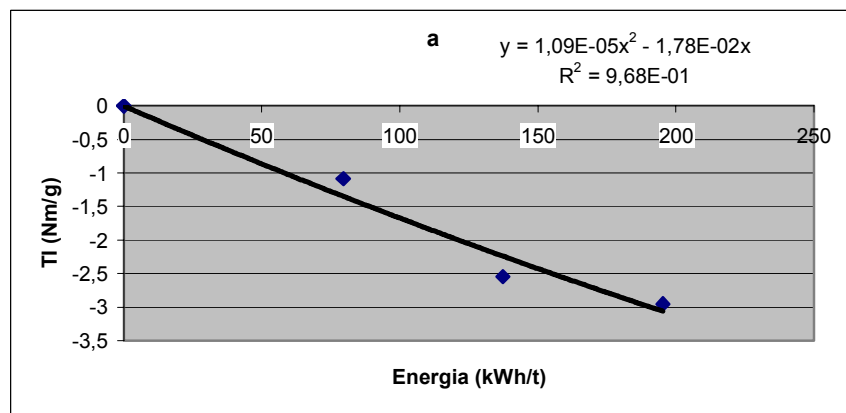
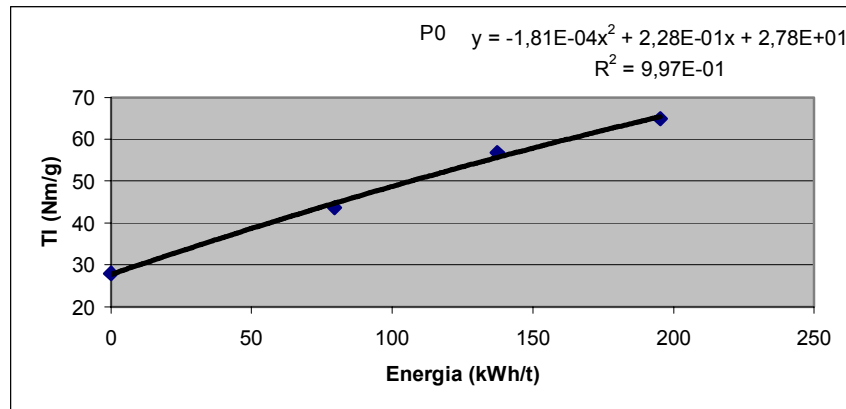
BÉTULA – Massa Volúmica



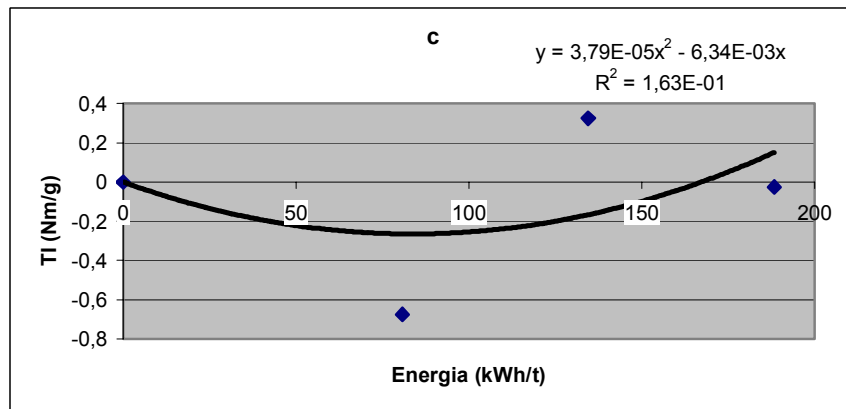
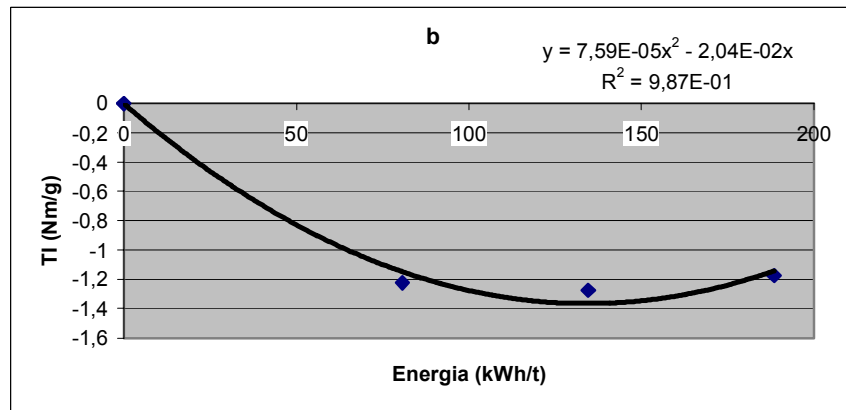
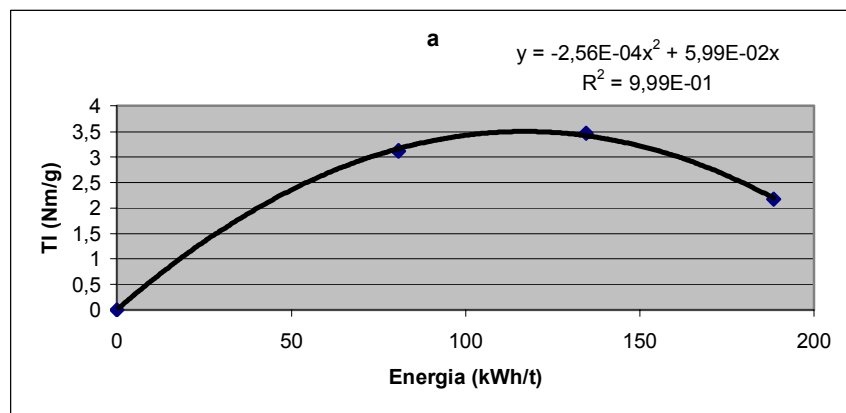
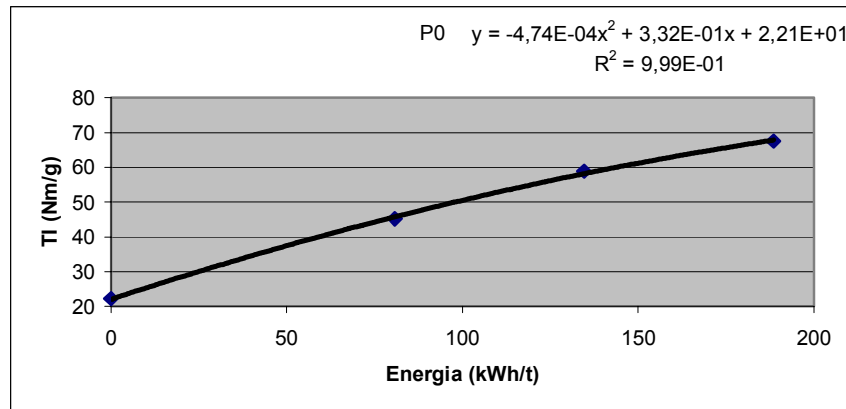
PINHO – Índice de Tracção



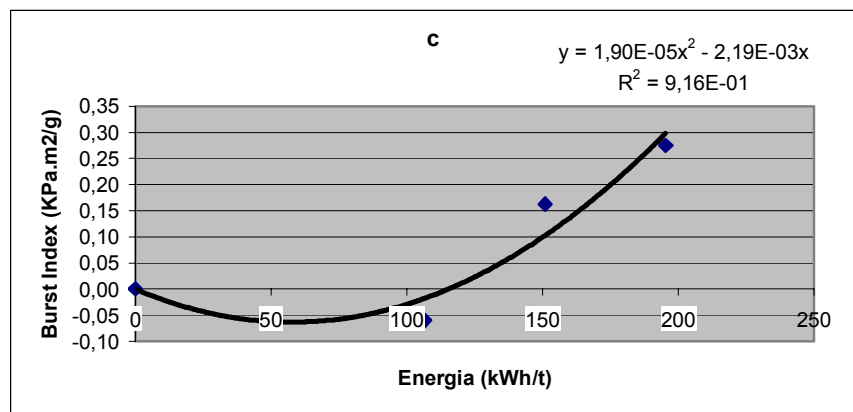
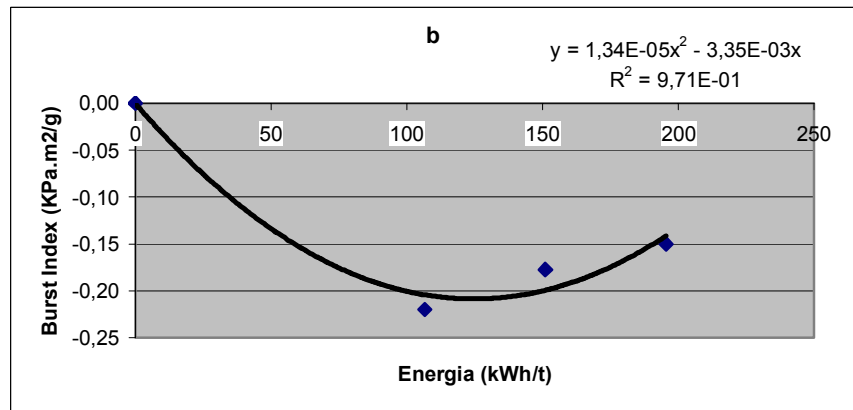
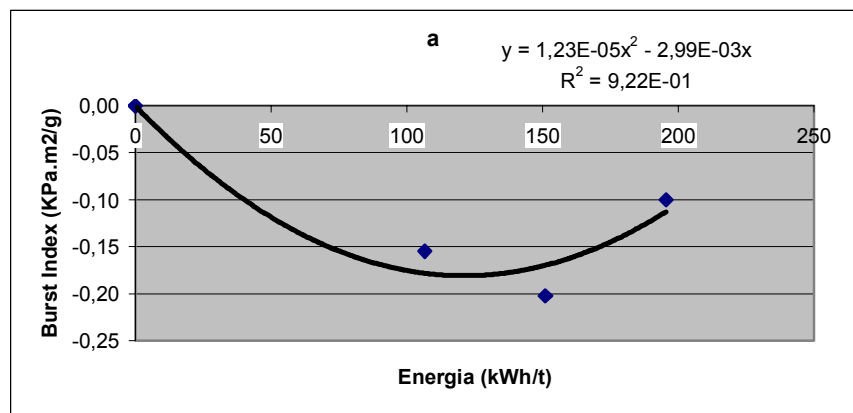
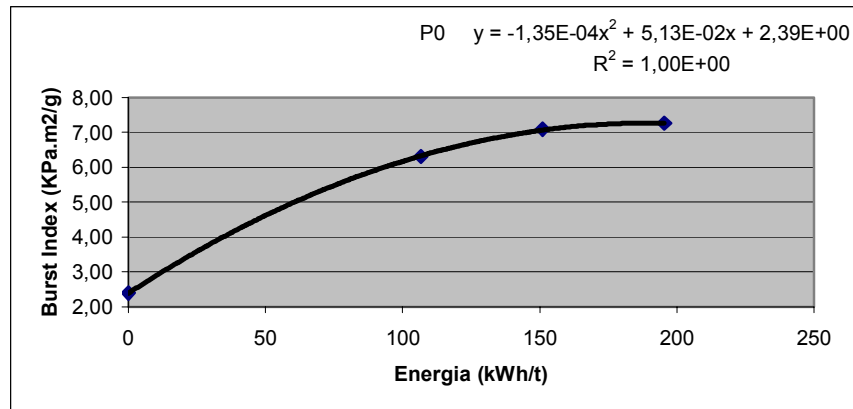
EUCALIPTO – Índice de Tracção



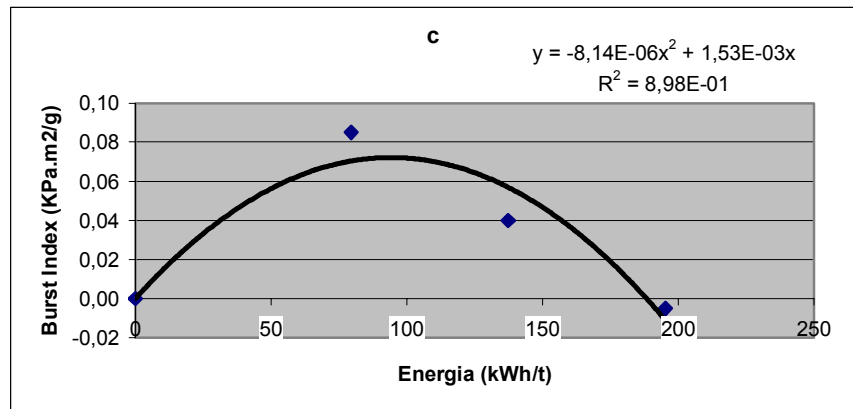
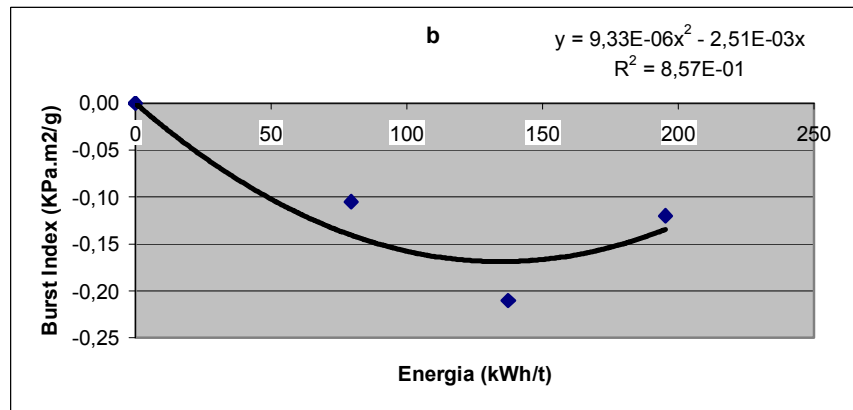
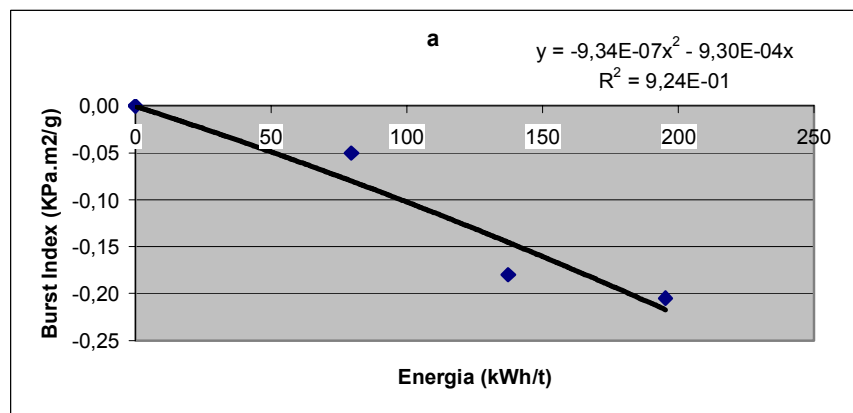
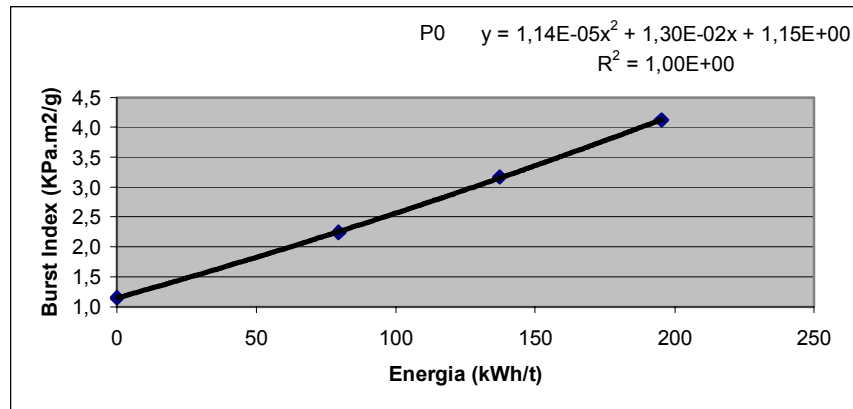
BÉTULA – Índice de Tracção



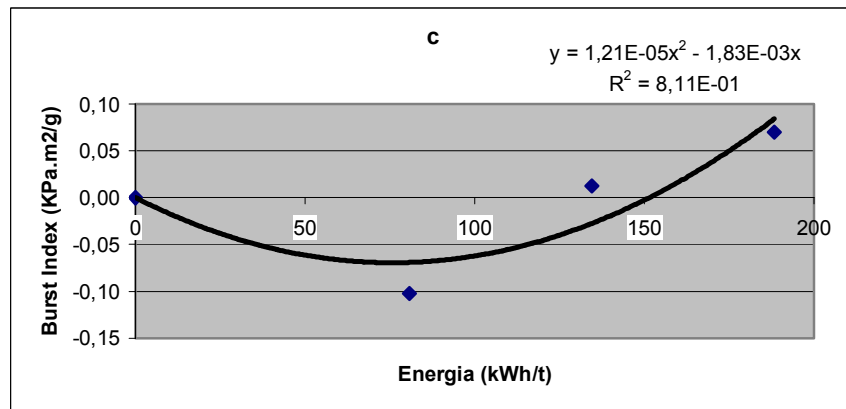
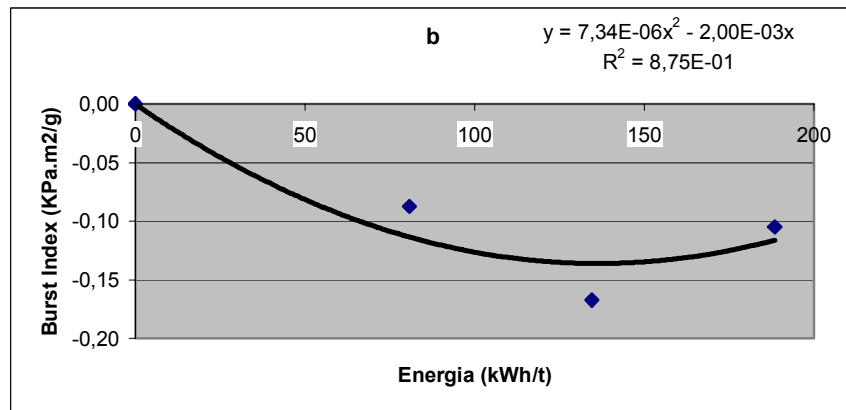
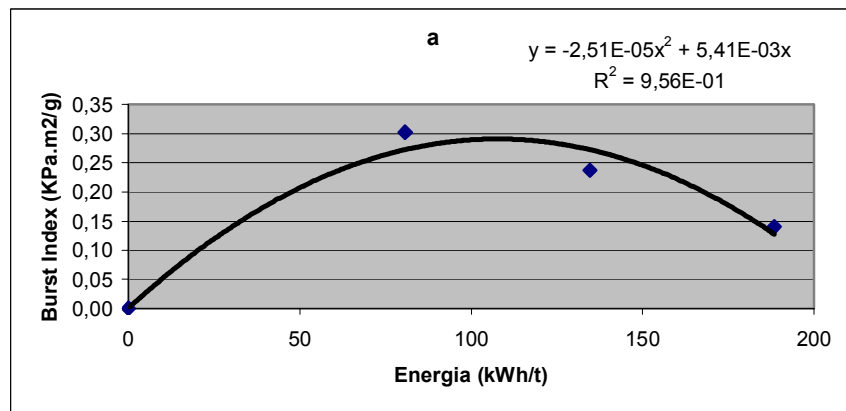
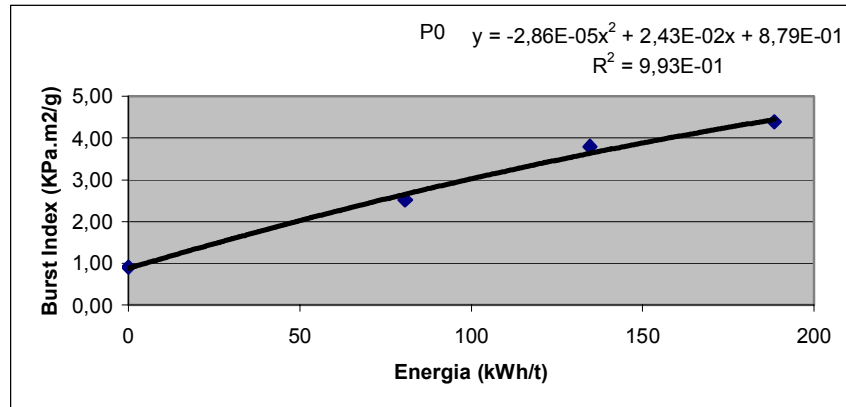
PINHO – Índice de Rebentamento



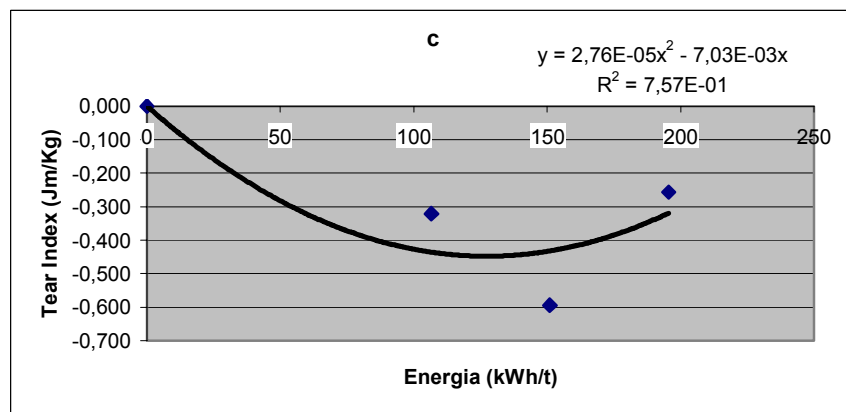
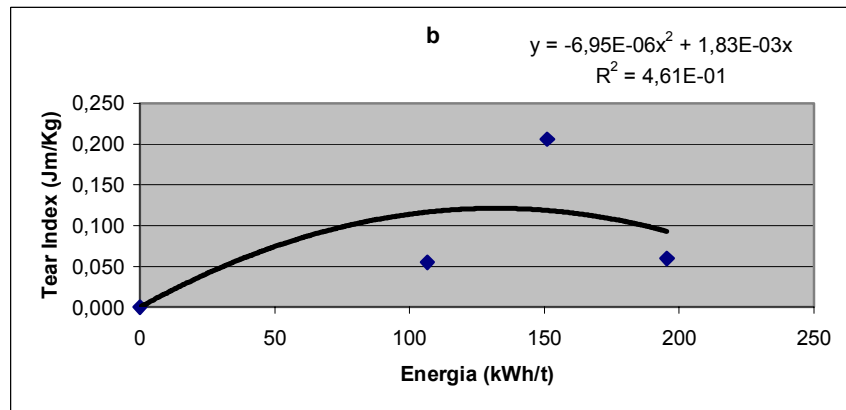
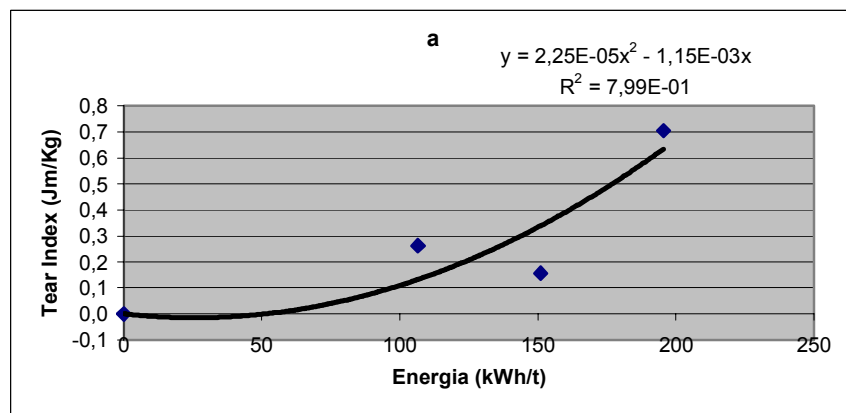
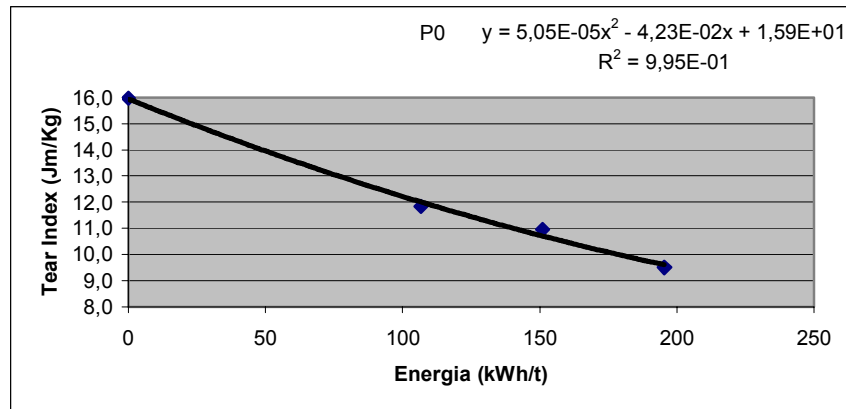
EUCALIPTO – Índice de Rebentamento



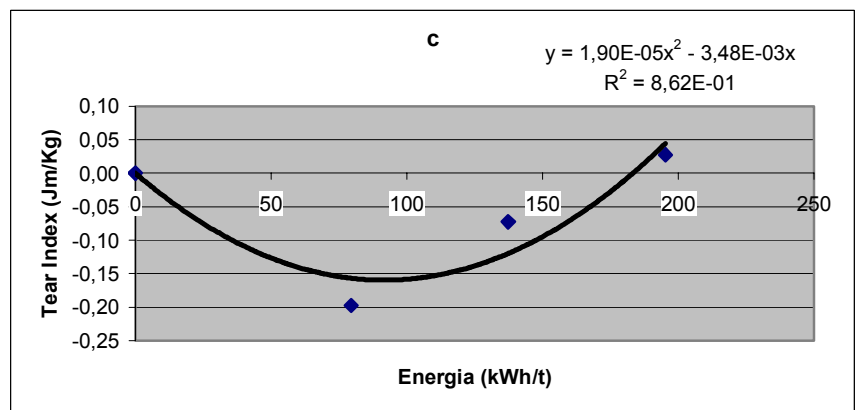
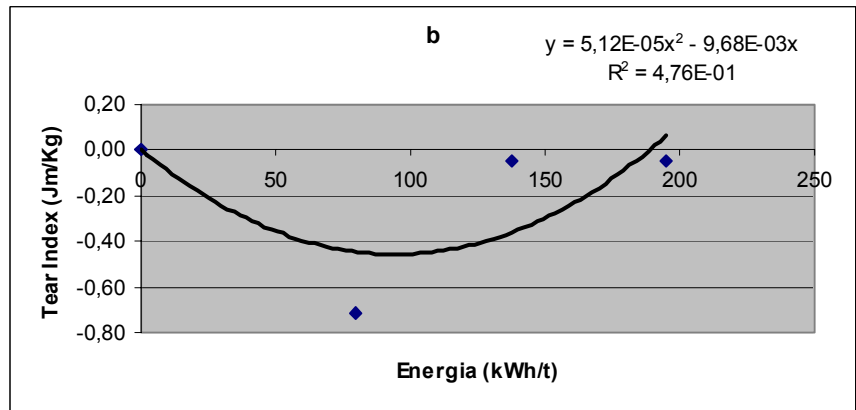
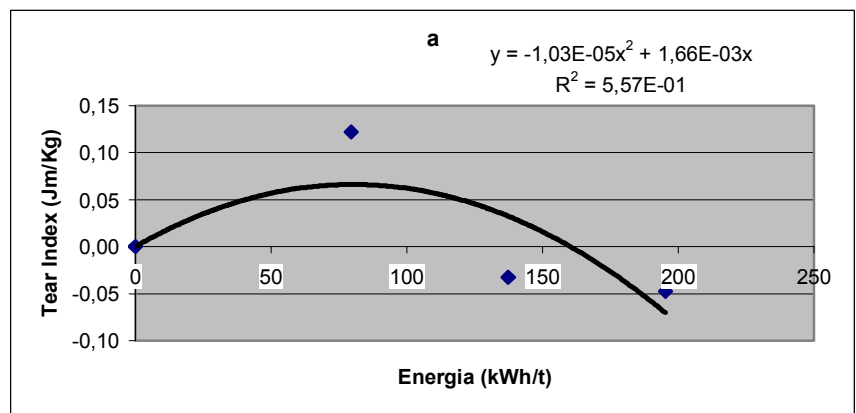
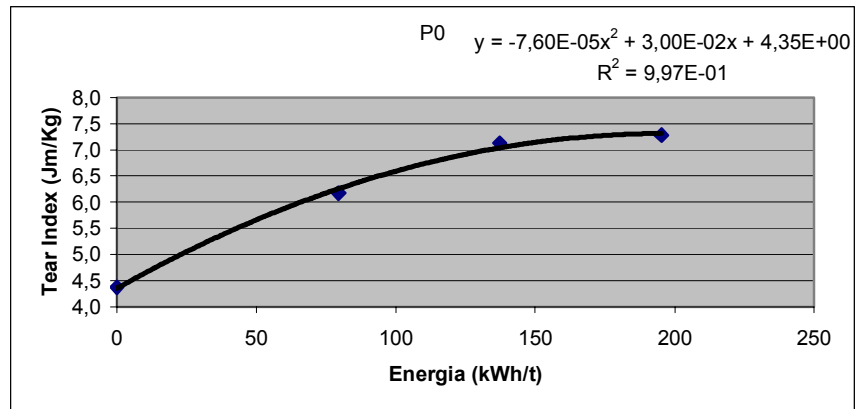
BÉTULA – Índice de Rebentamento



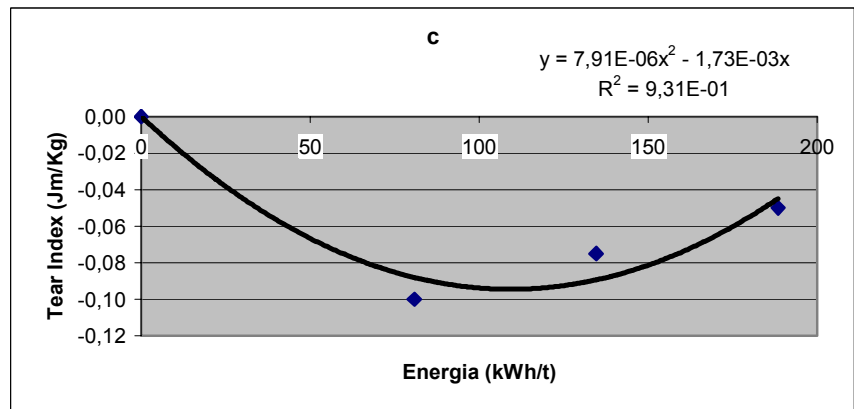
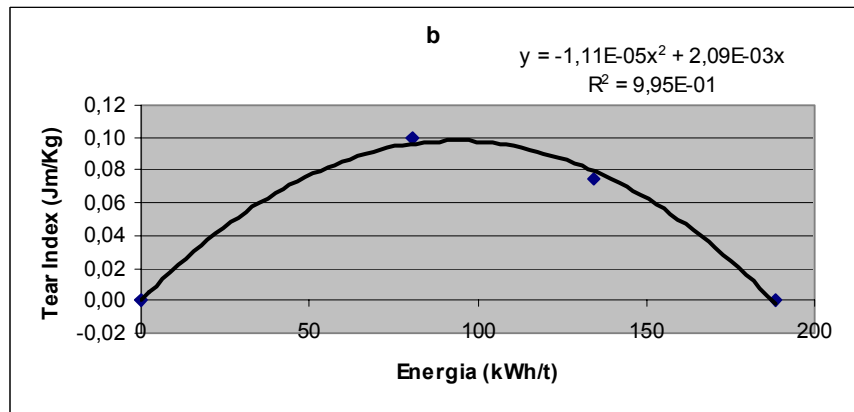
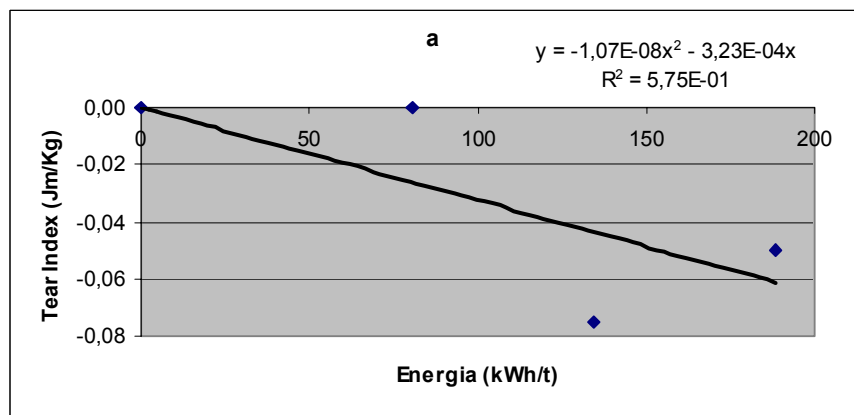
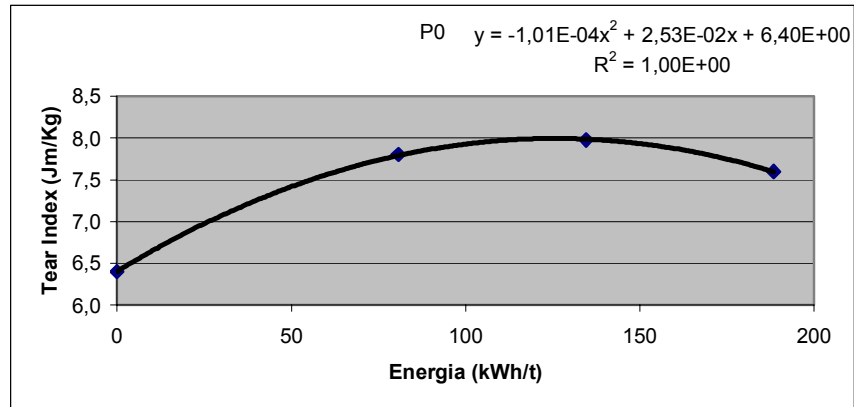
PINHO – Índice de Rasgamento



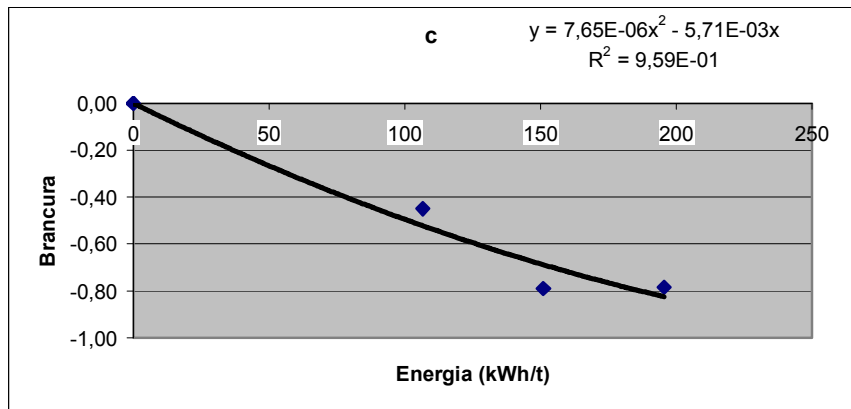
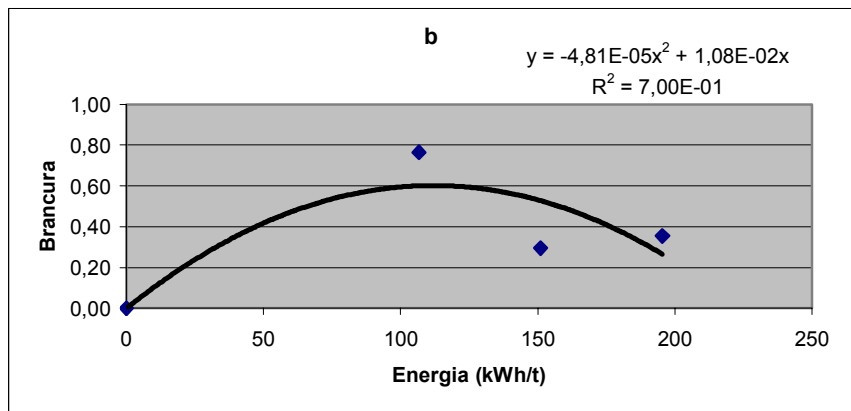
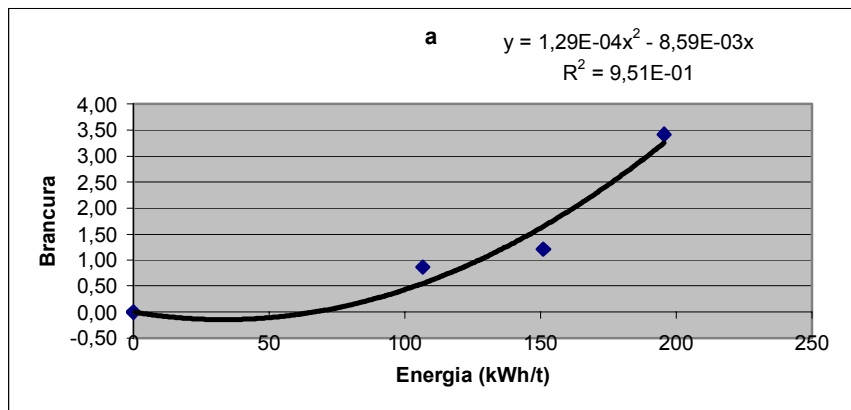
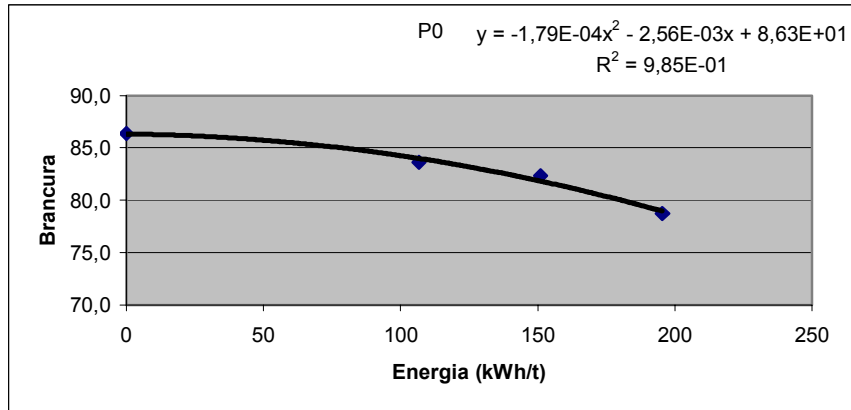
EUCALIPTO – Índice de Rasgamento



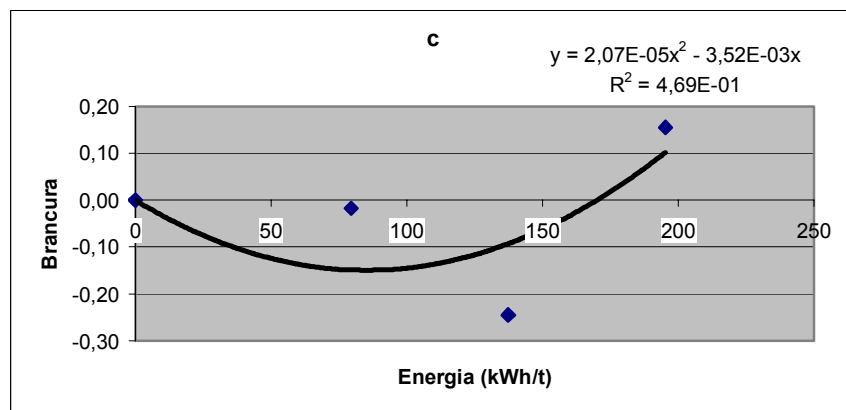
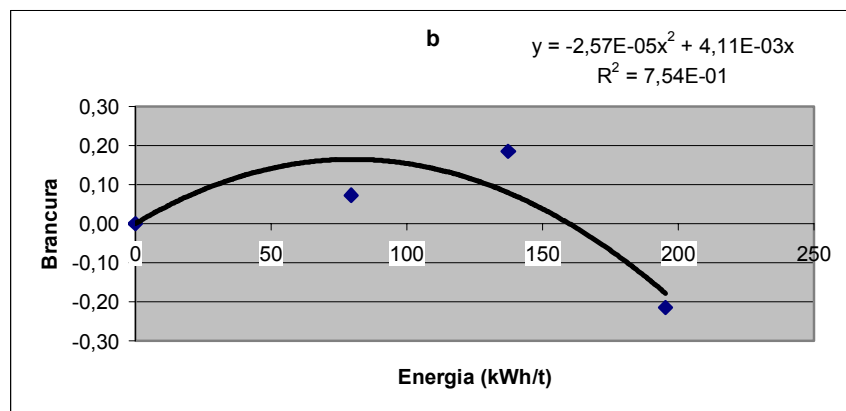
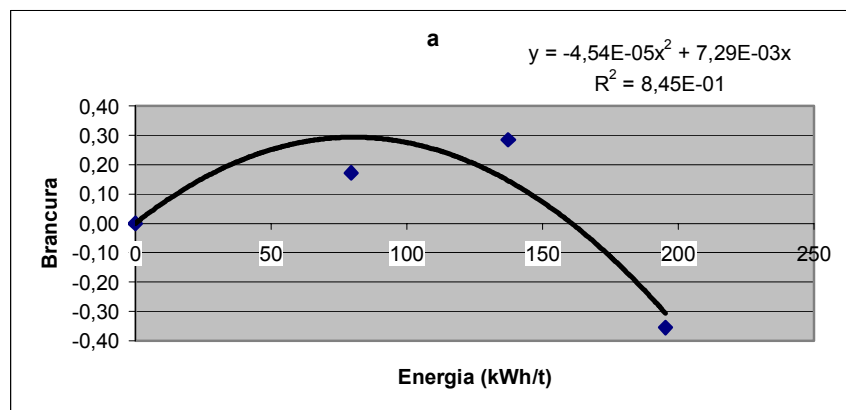
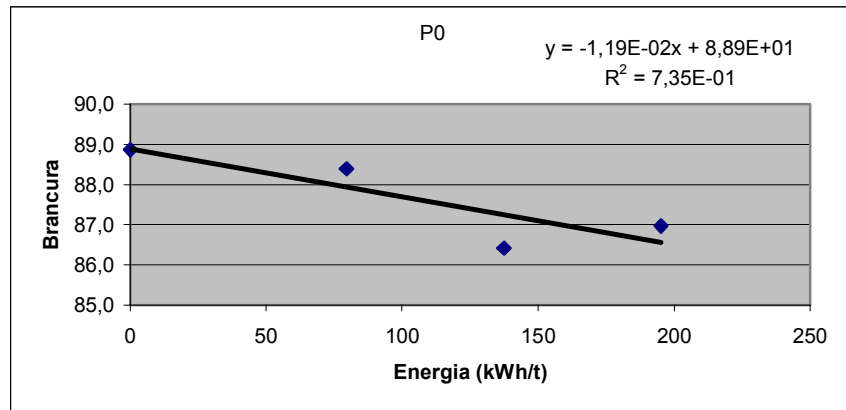
BÉTULA - Índice de Rasgamento



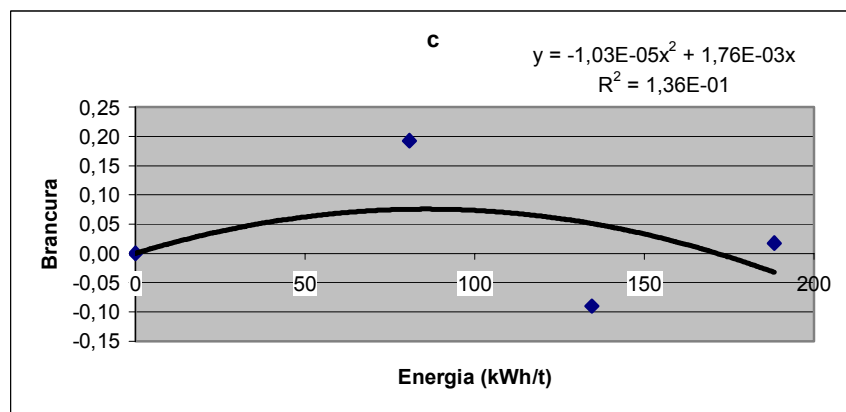
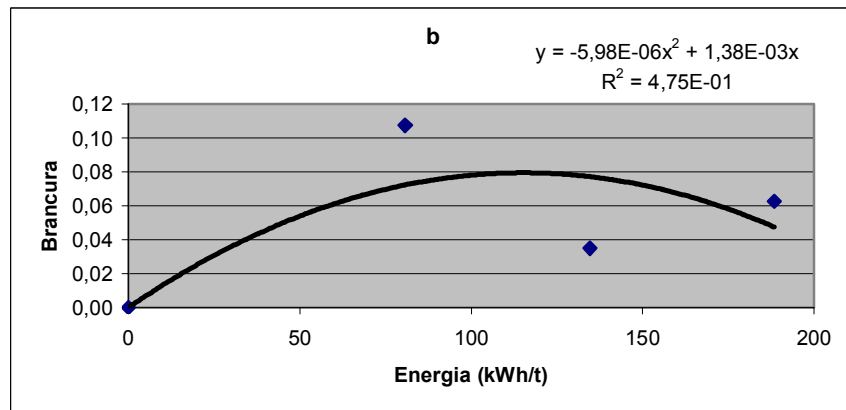
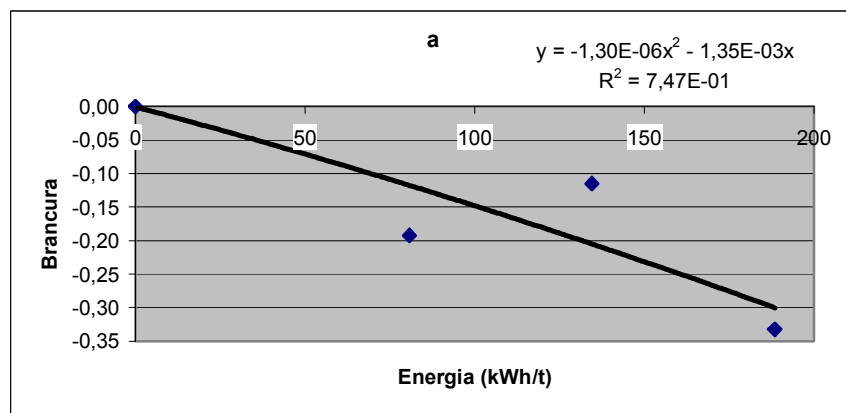
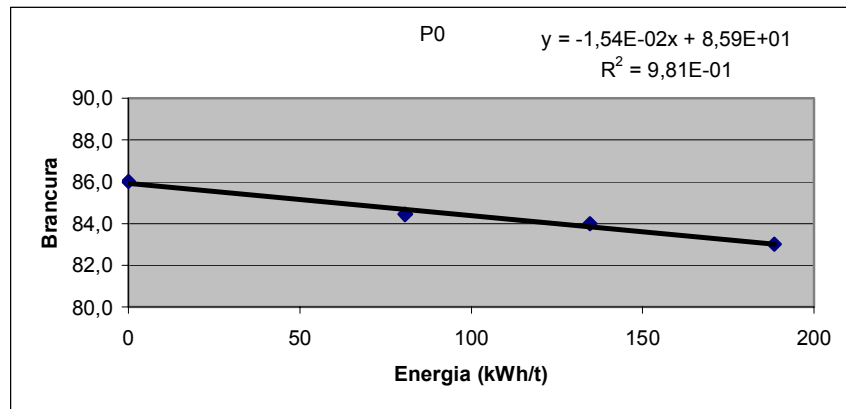
PINHO – Brancura (%)



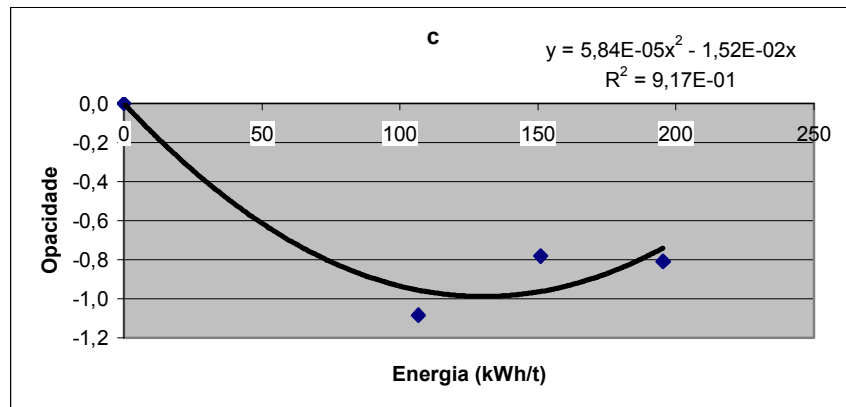
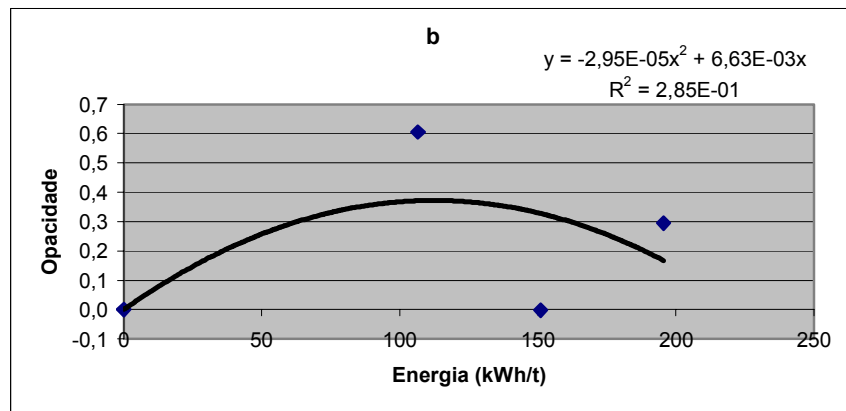
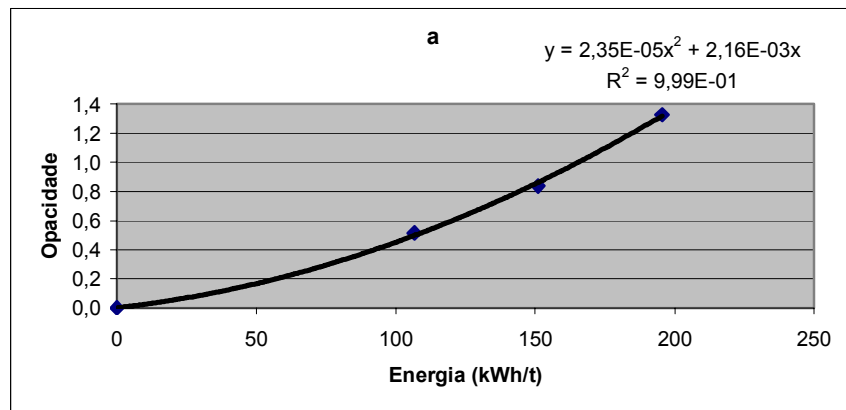
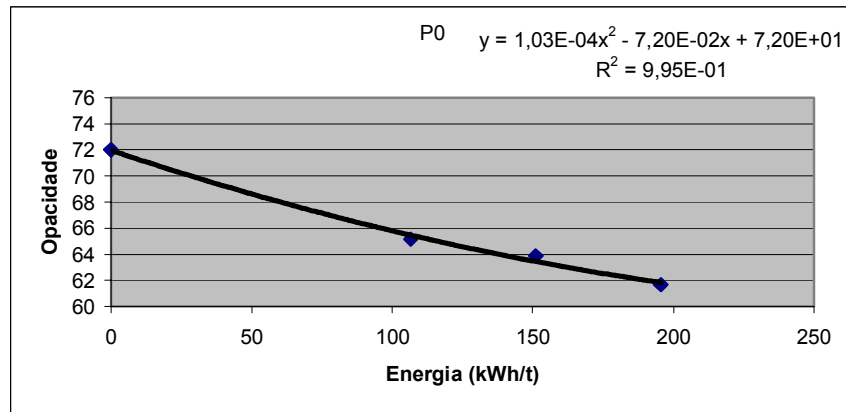
EUCALIPTO – Brancura (%)



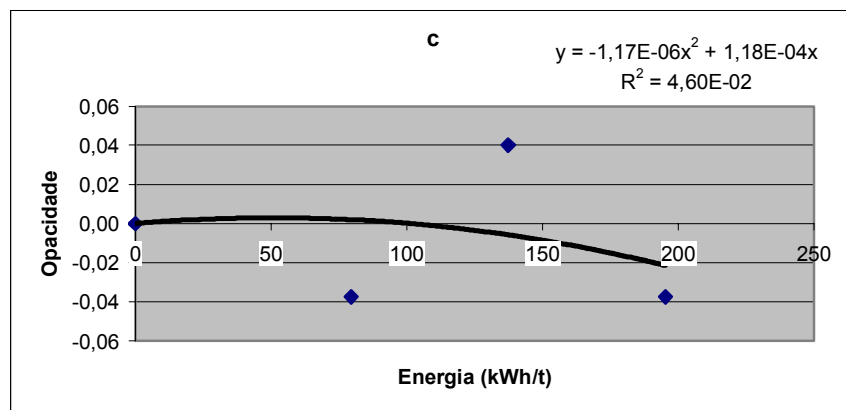
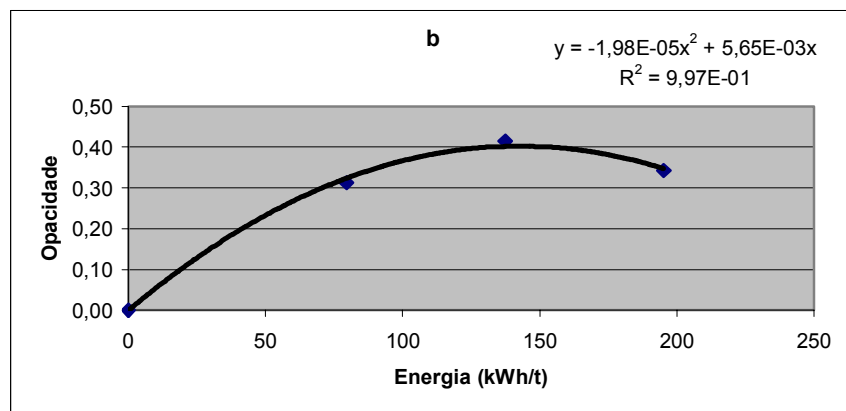
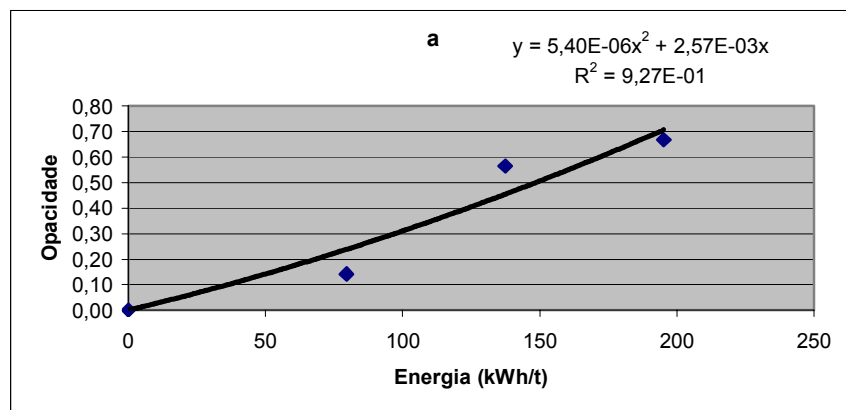
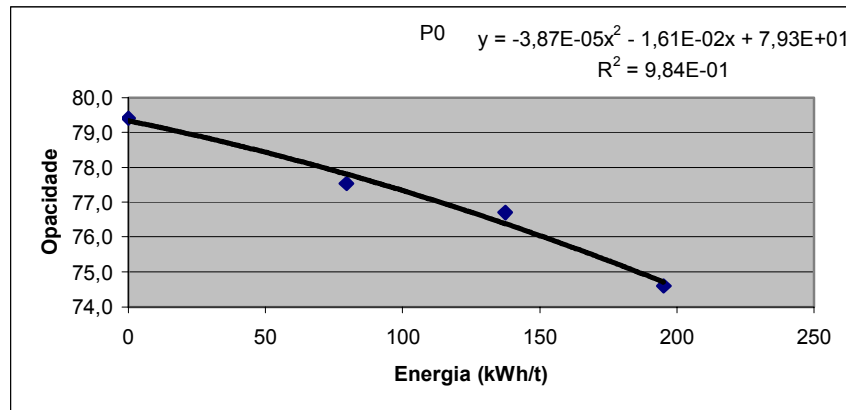
BÉTULA - Brancura (%)



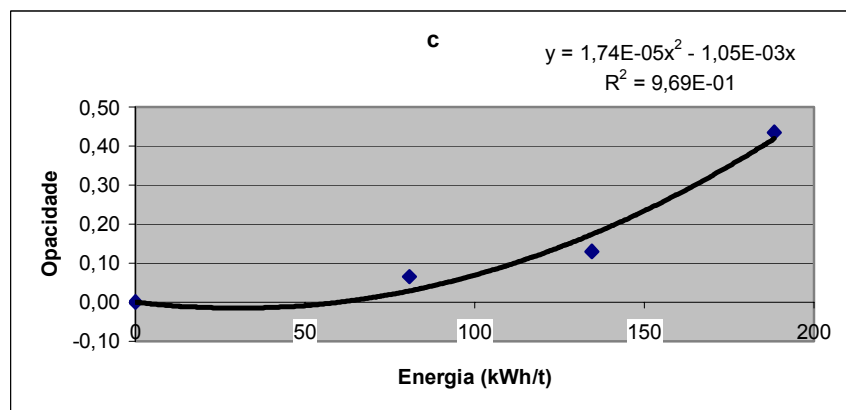
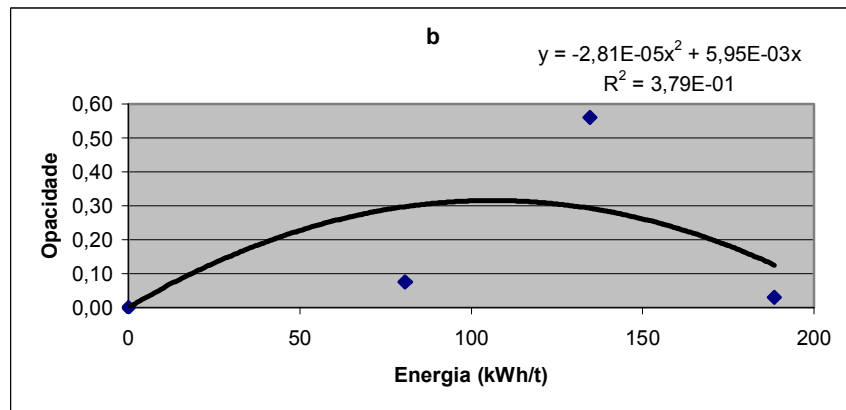
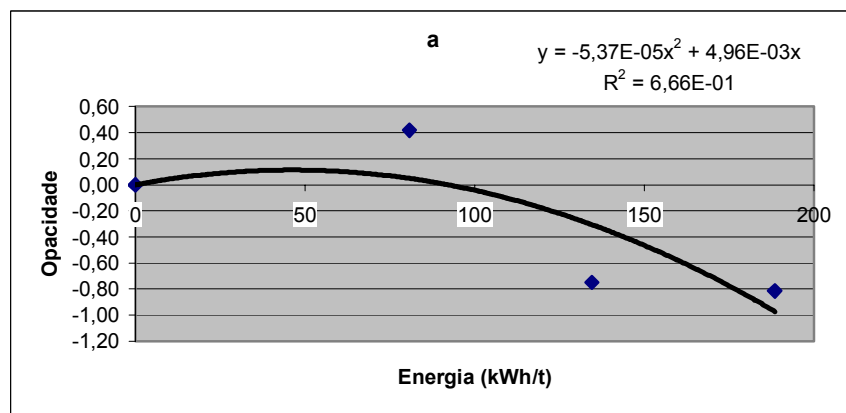
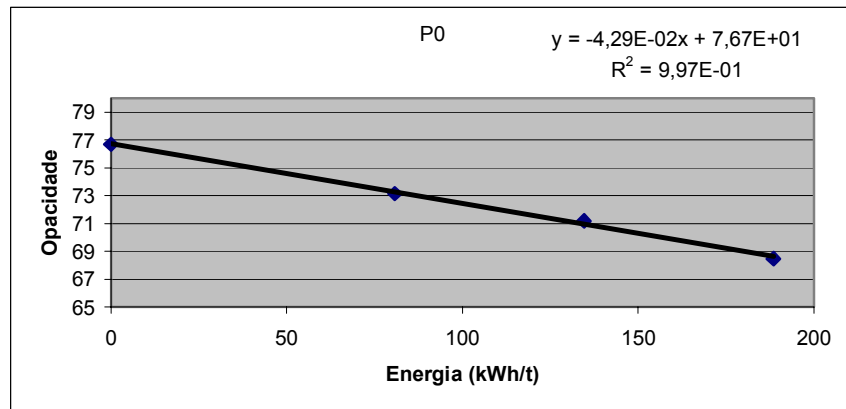
PINHO – Opacidade (%)



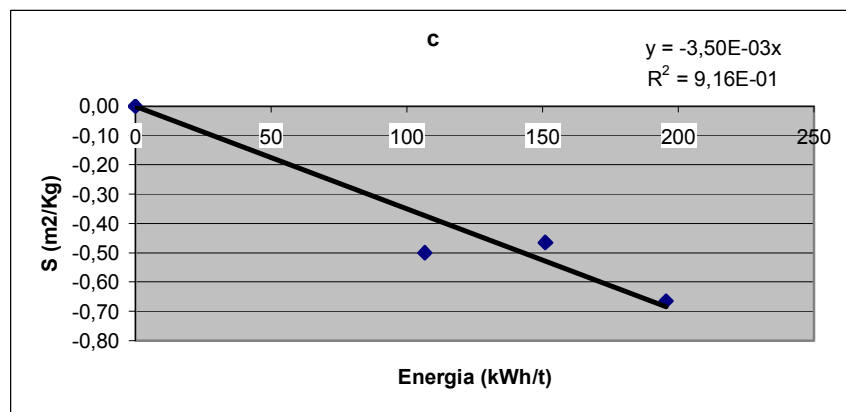
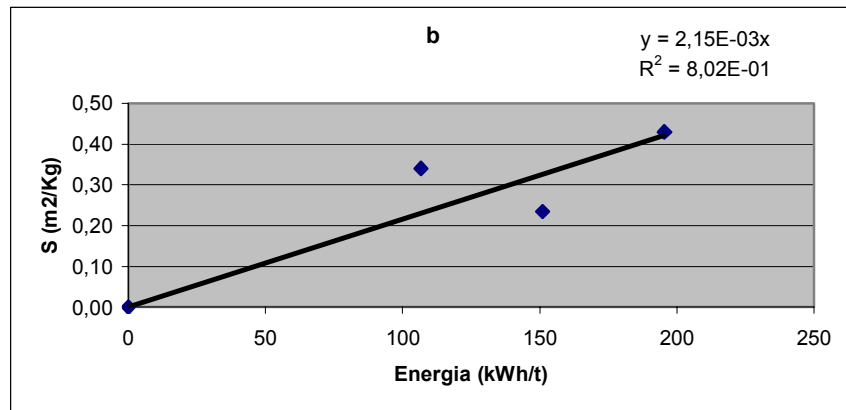
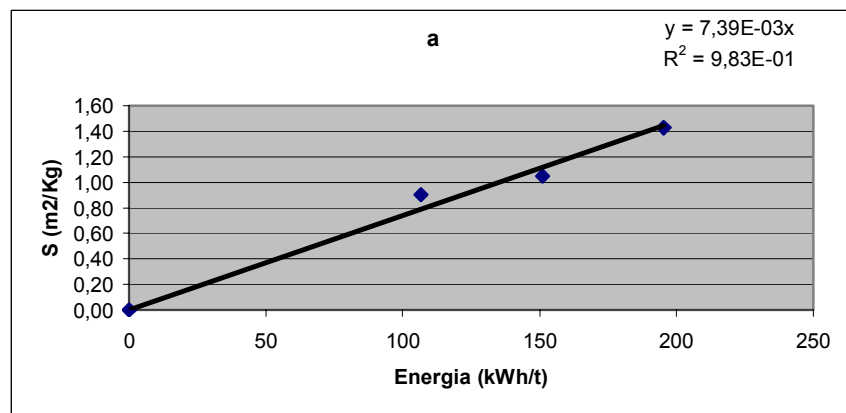
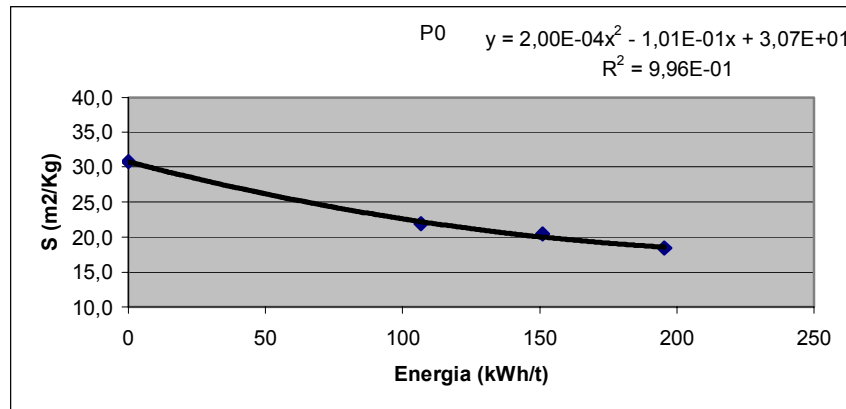
EUCALIPTO – Opacidade (%)



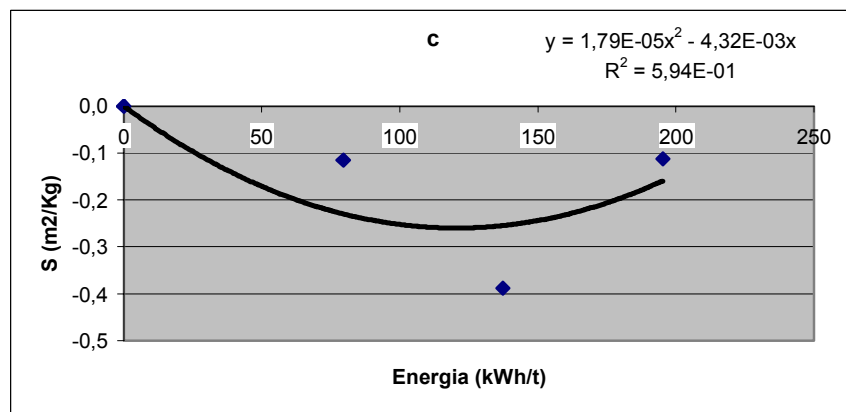
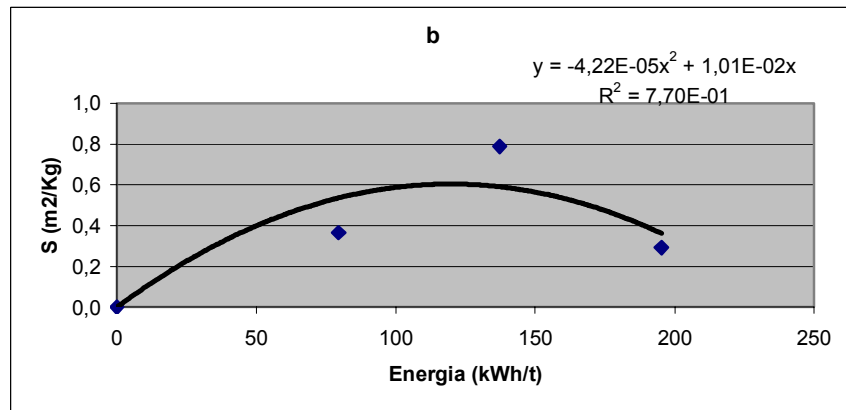
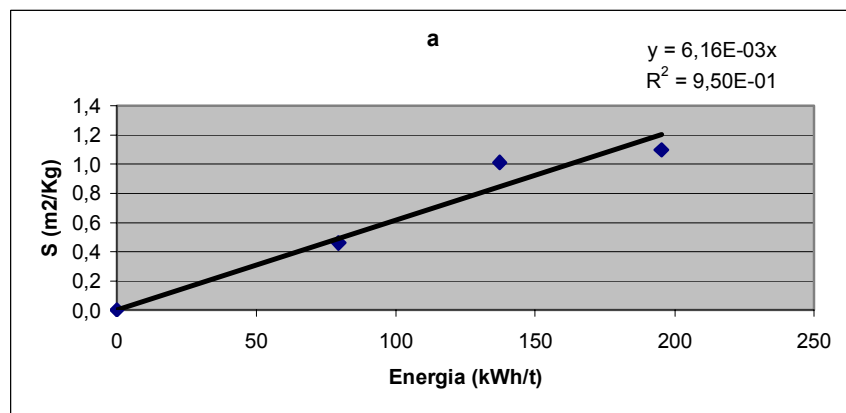
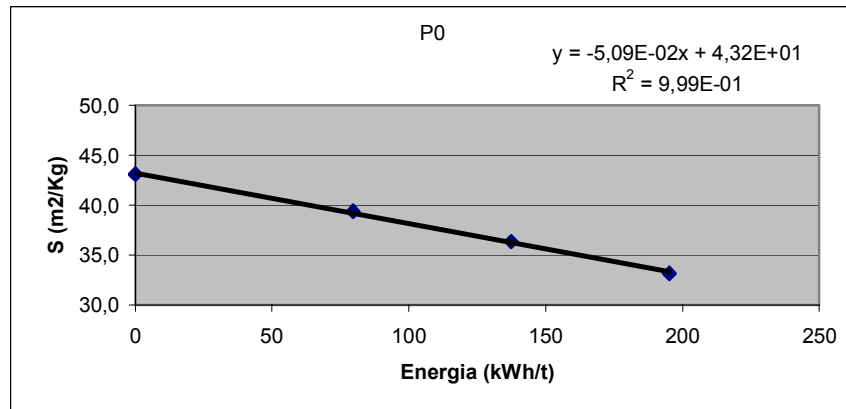
BÉTULA – Opacidade (%)



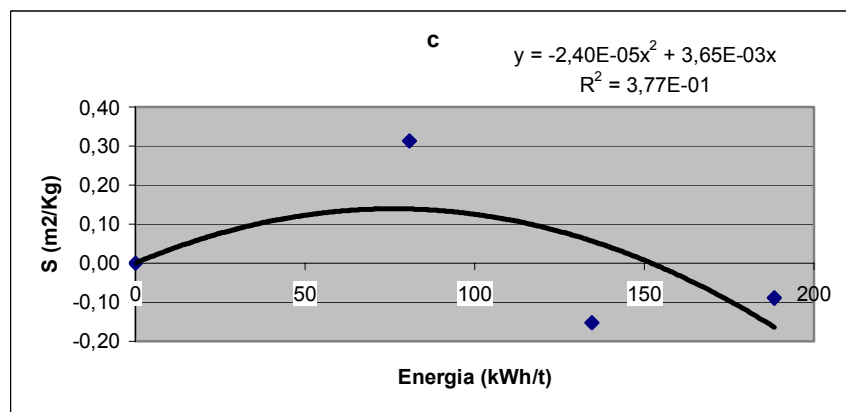
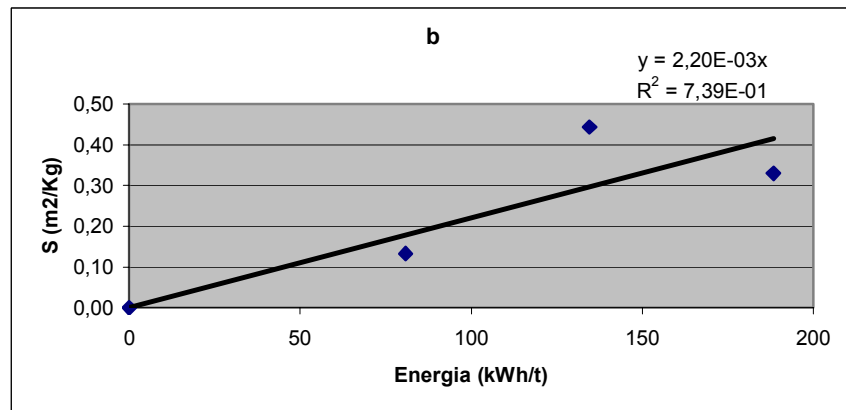
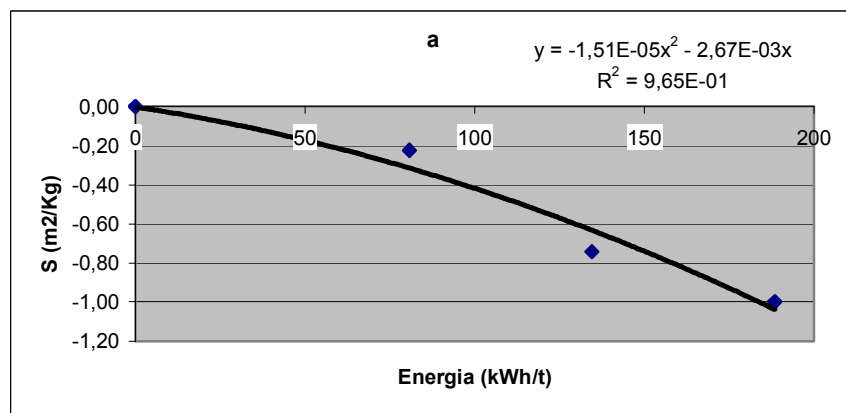
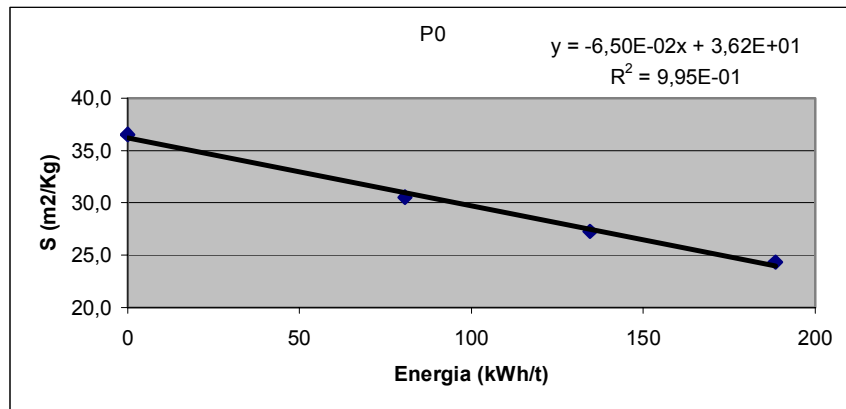
PINHO – Coeficiente de Dispersão



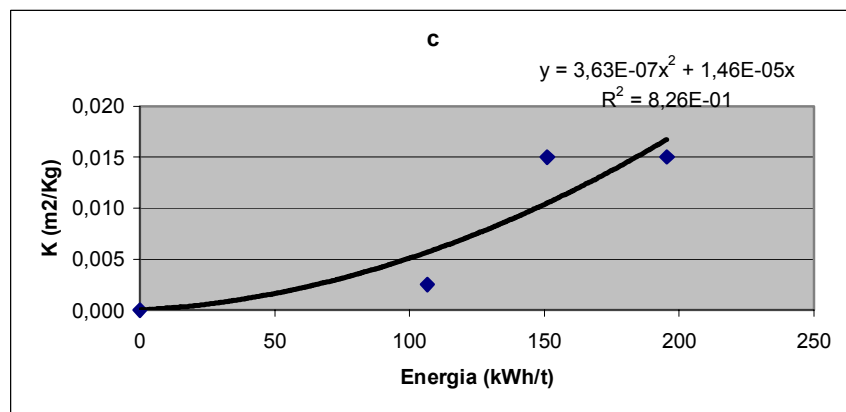
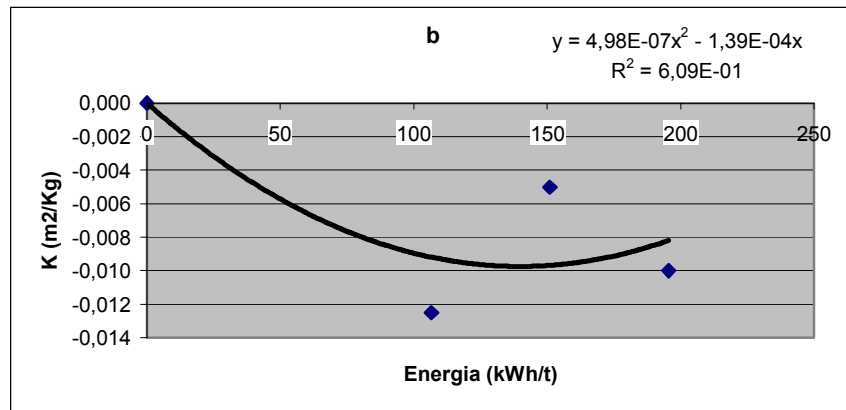
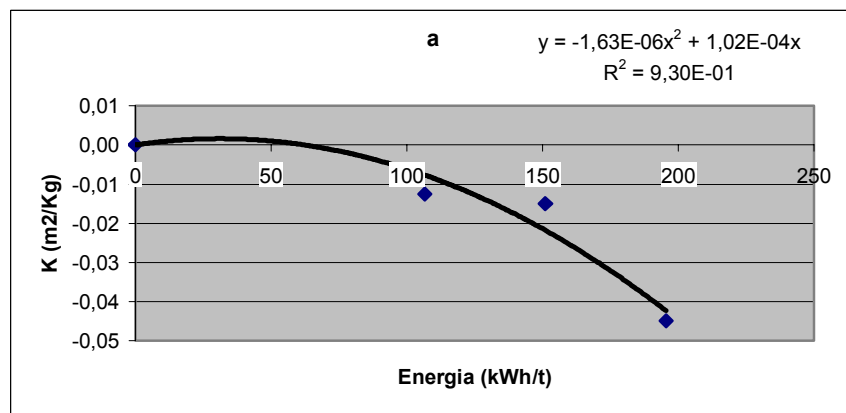
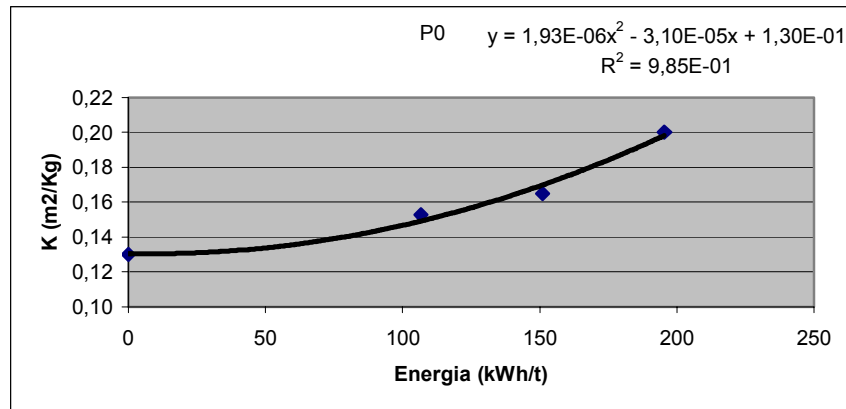
EUCALIPTO – Coeficiente de Dispersão



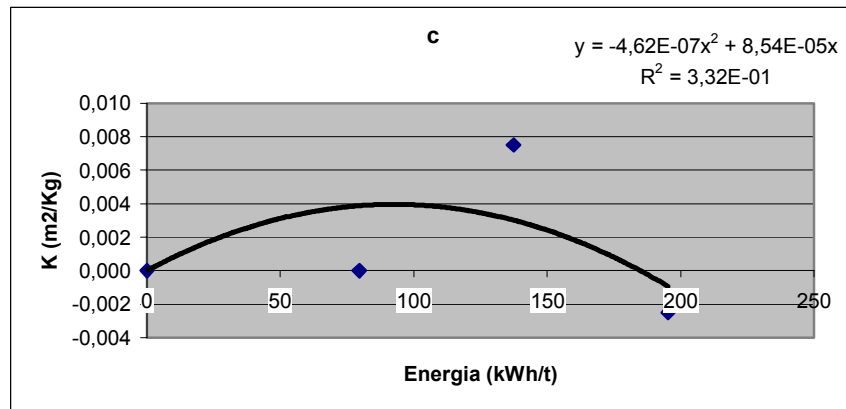
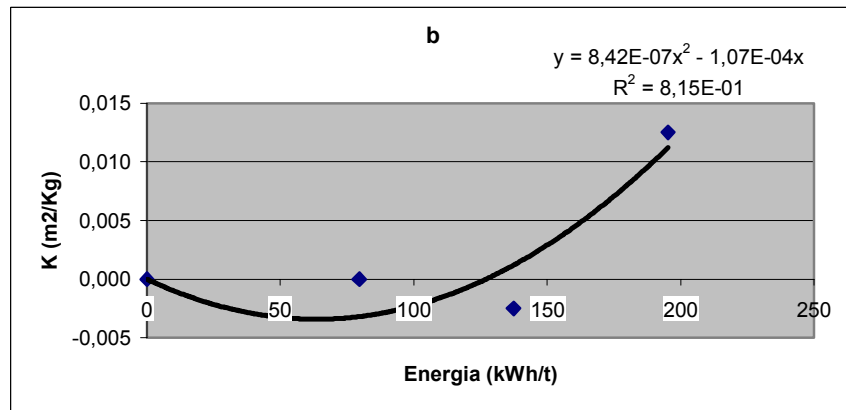
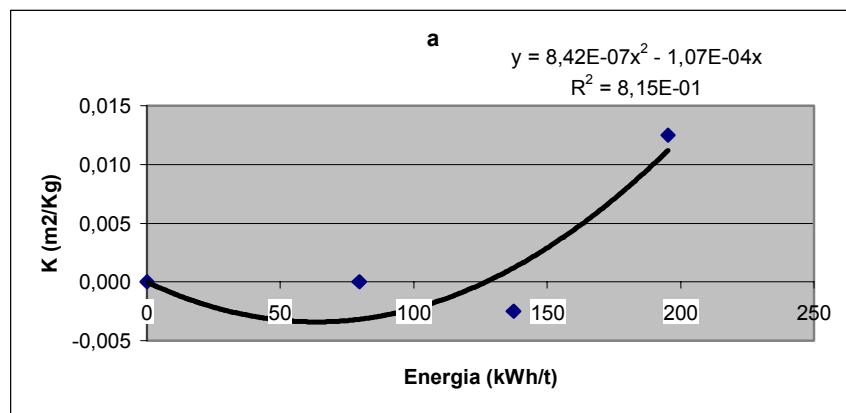
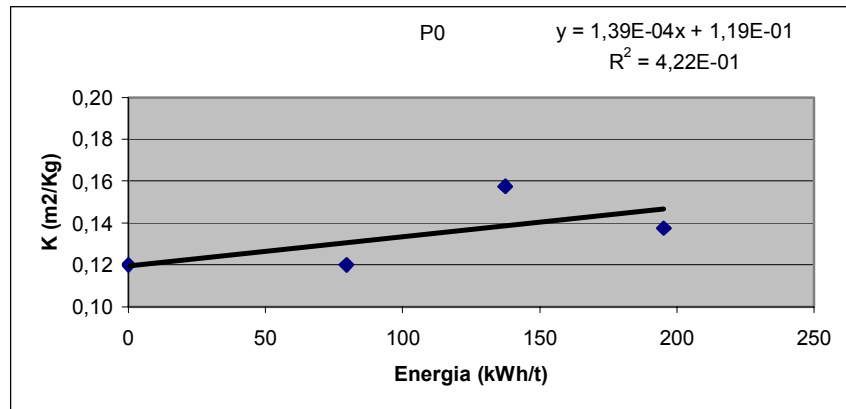
BÉTULA – Coeficiente de Dispersão



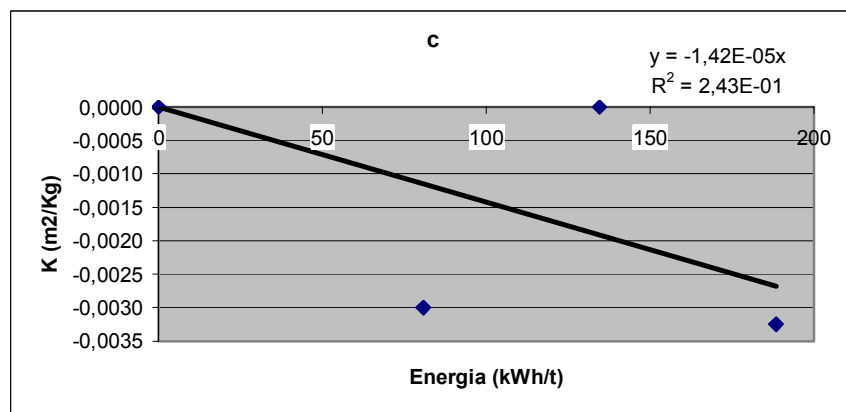
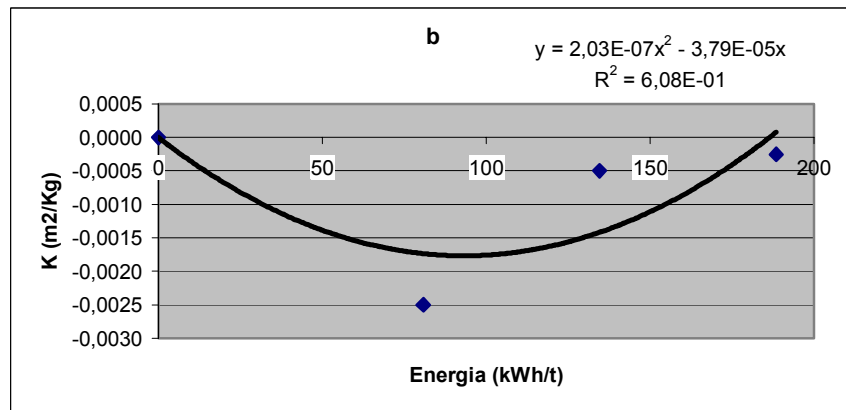
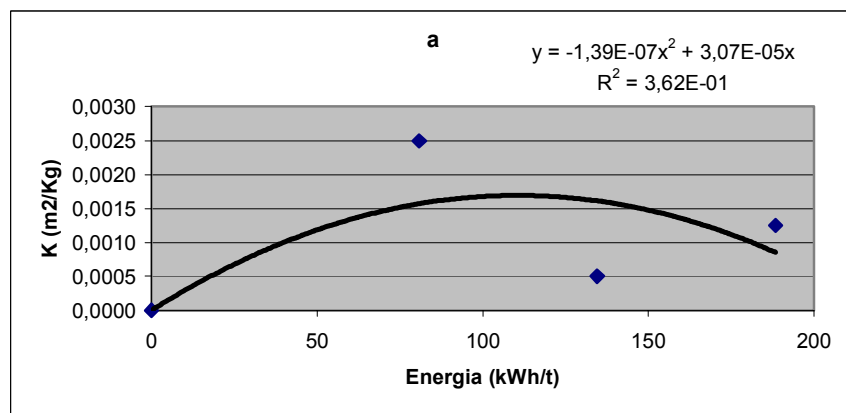
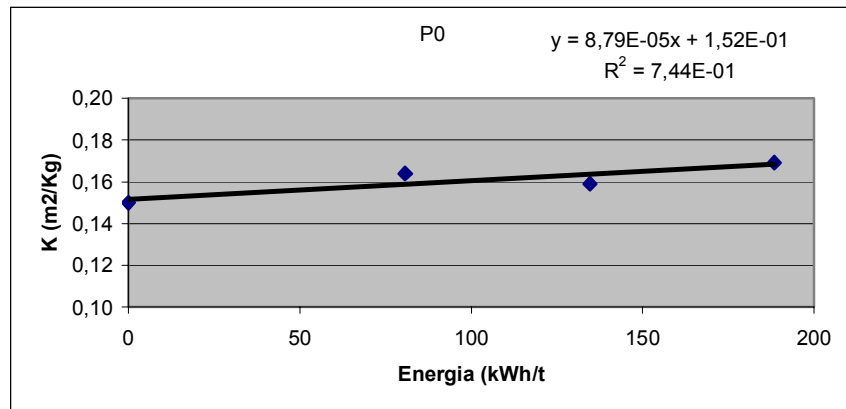
PINHO – Coeficiente de Absorção



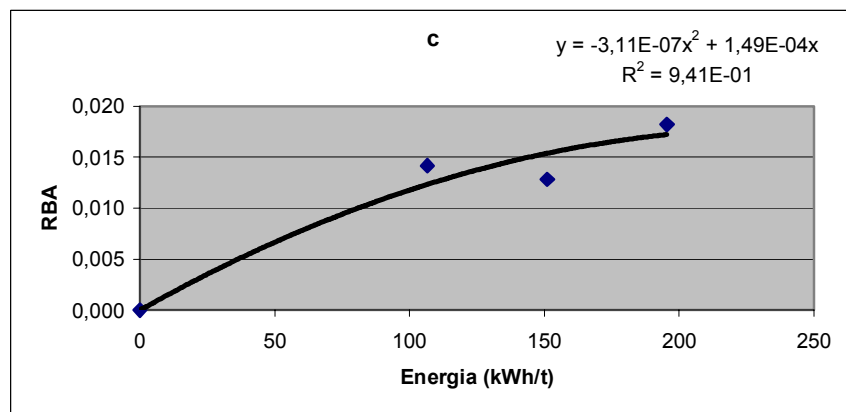
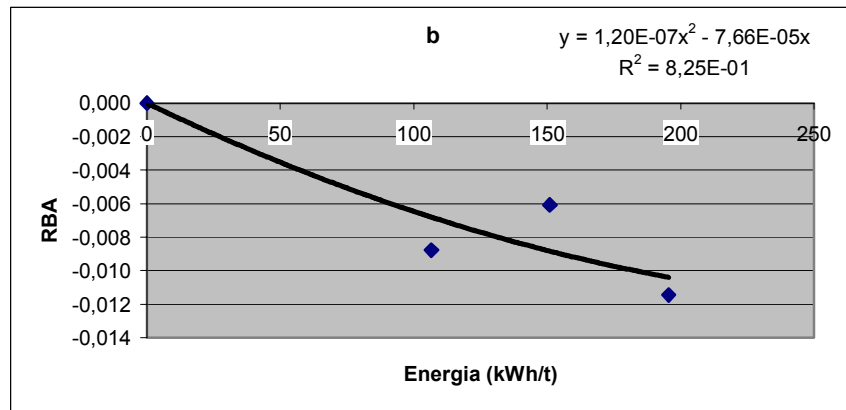
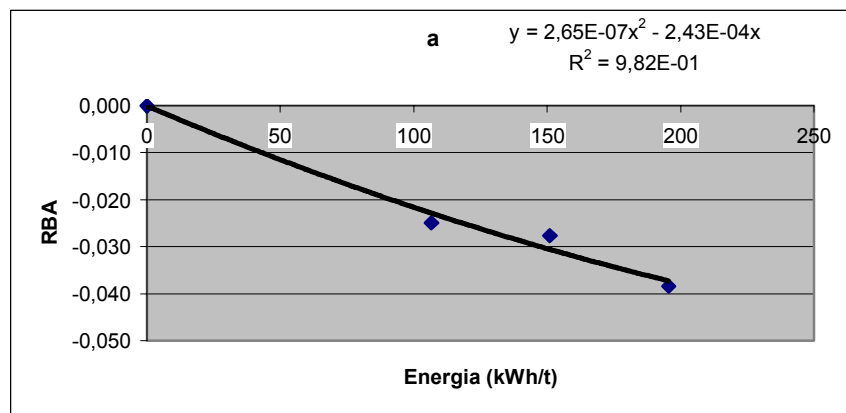
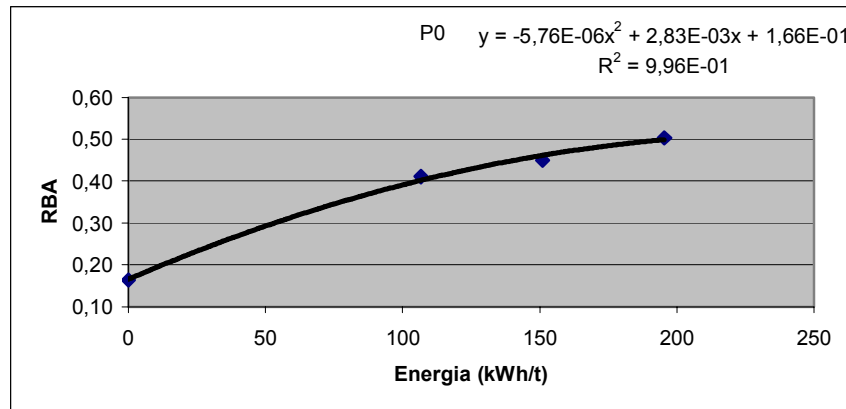
EUCALIPTO – Coeficiente de Absorção



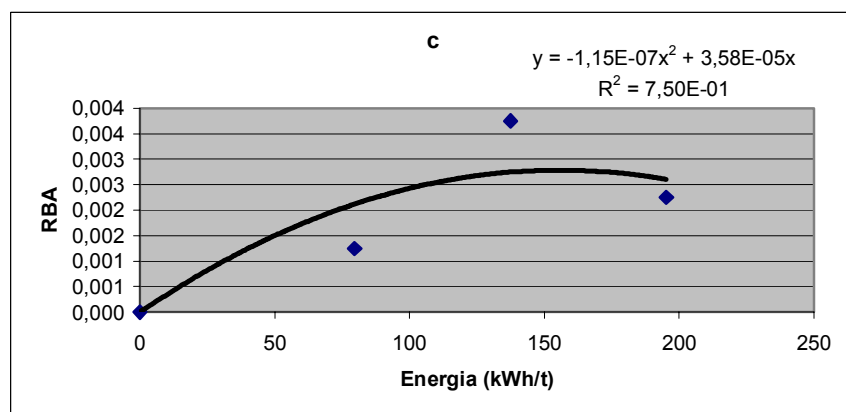
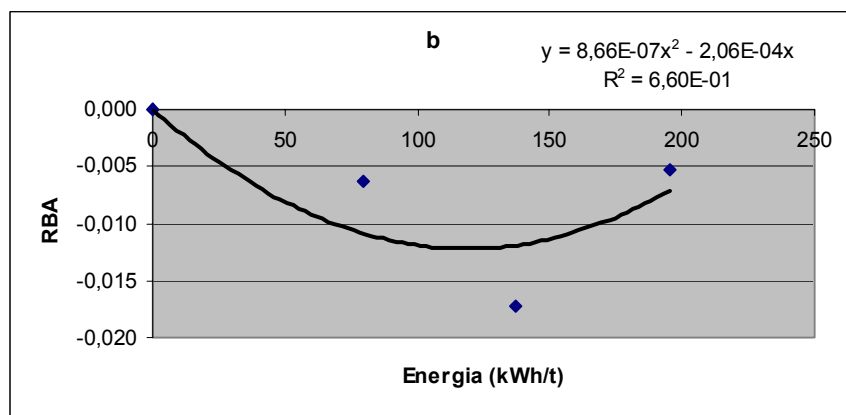
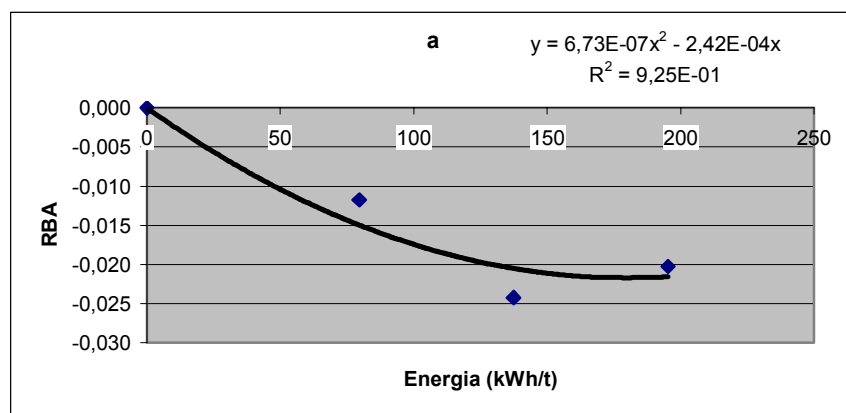
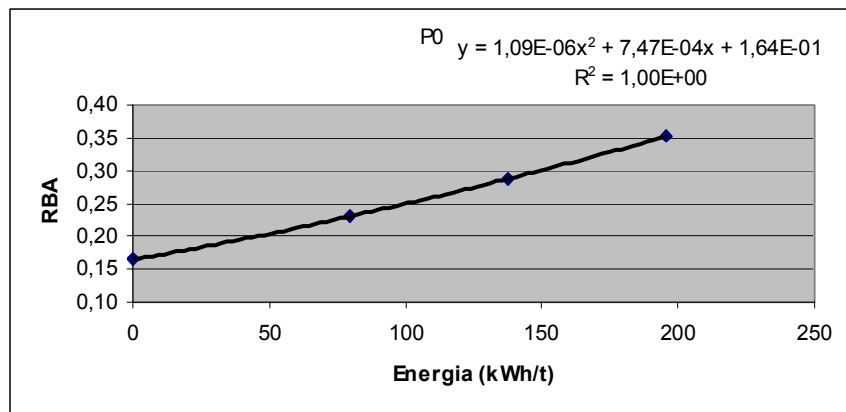
BÉTULA – Coeficiente de Absorção



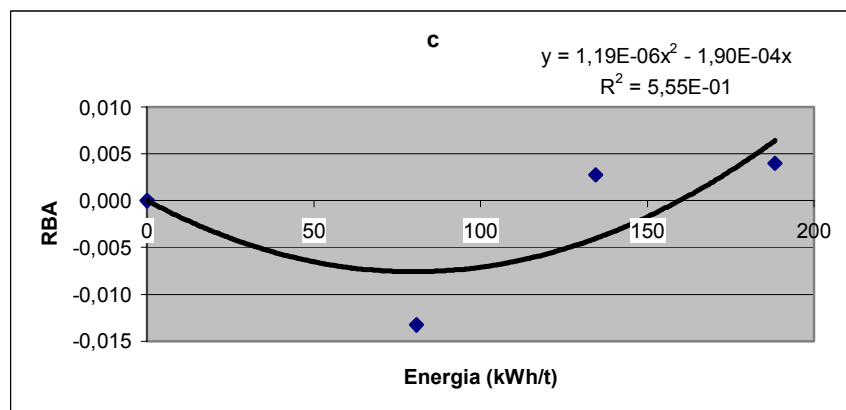
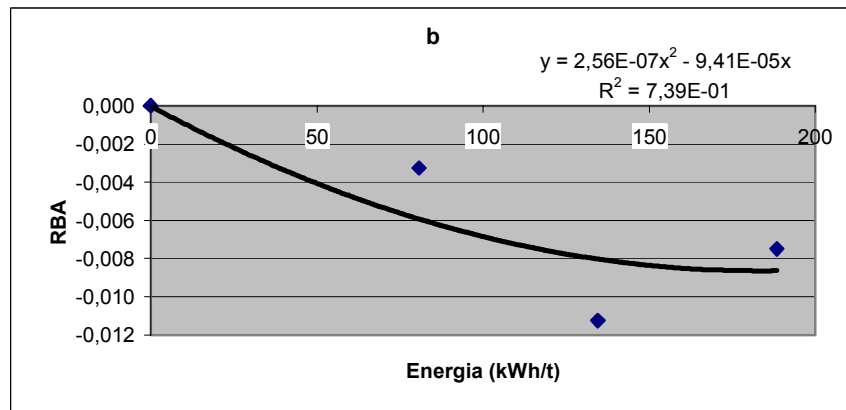
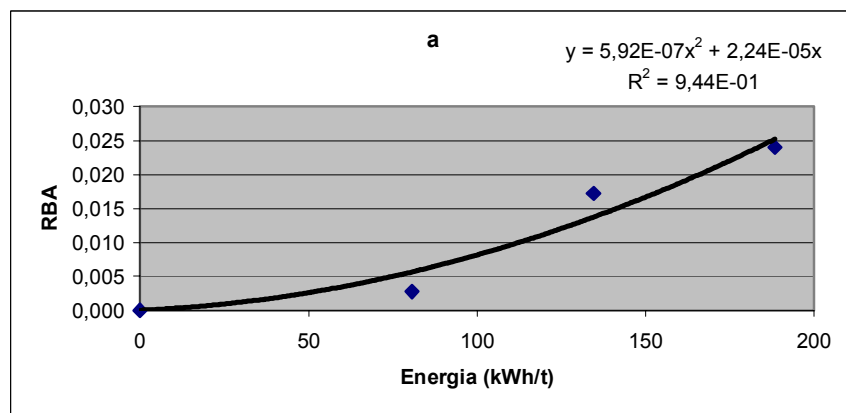
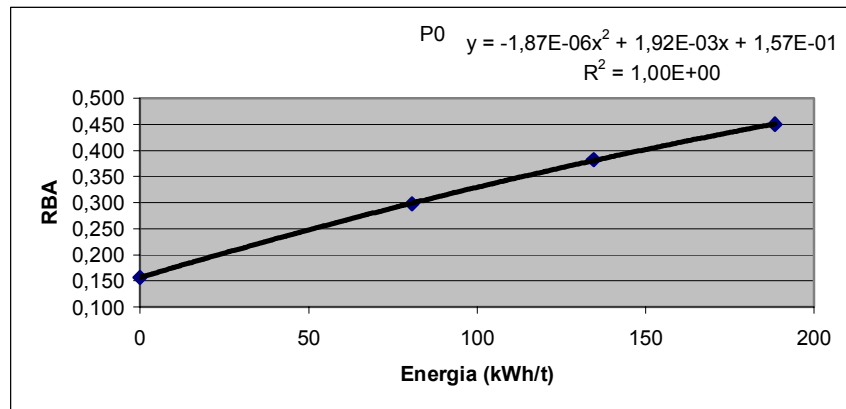
PINHO – R B A



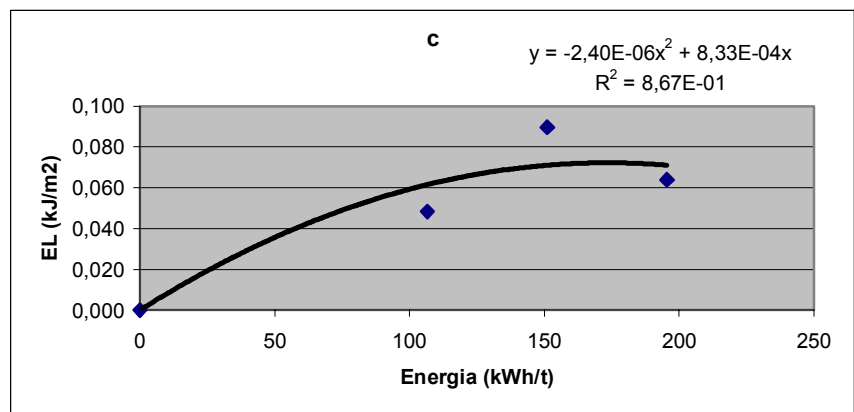
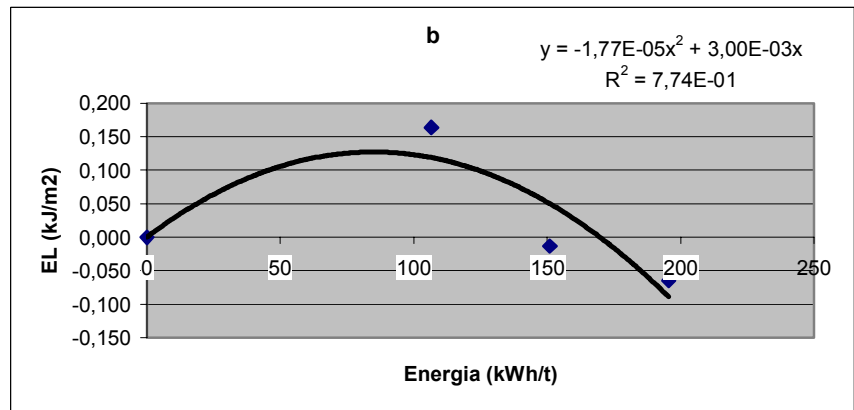
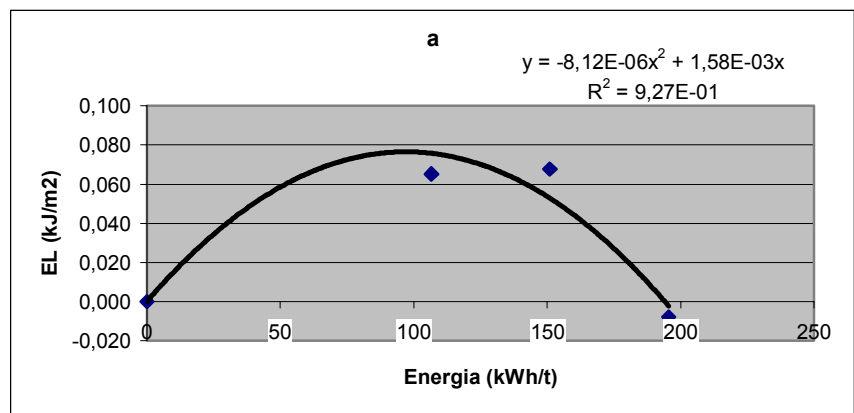
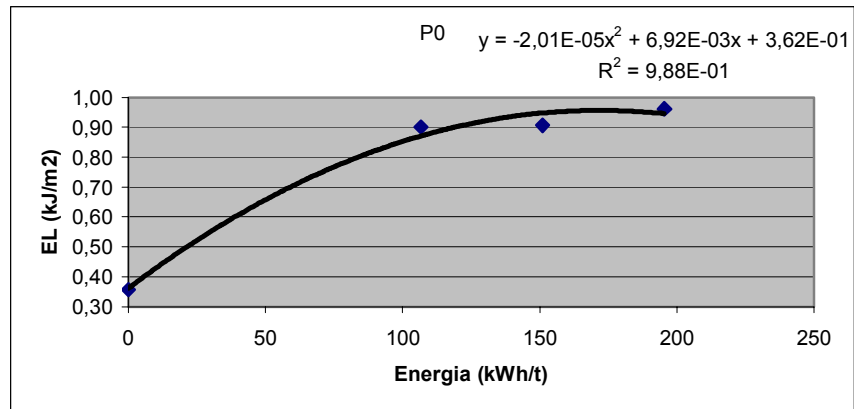
EUCALIPTO – R B A



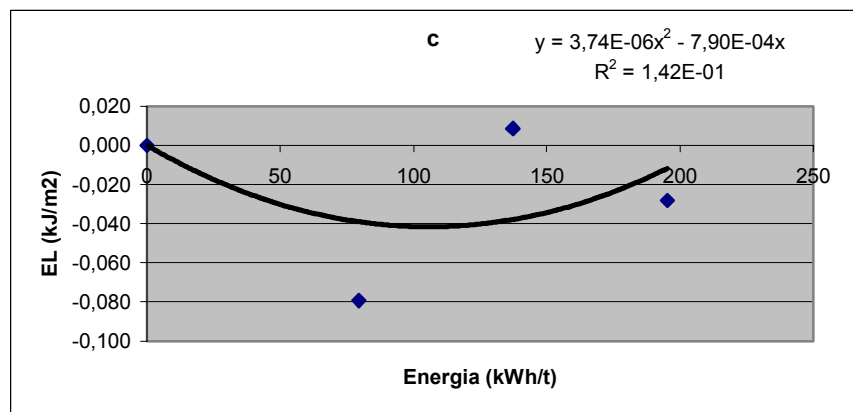
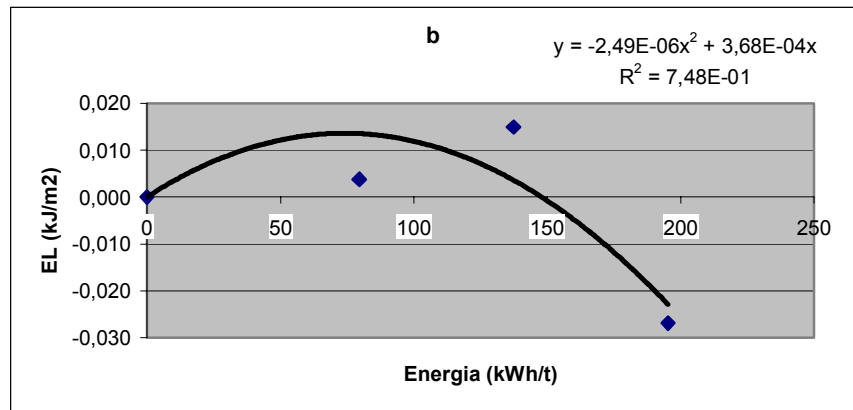
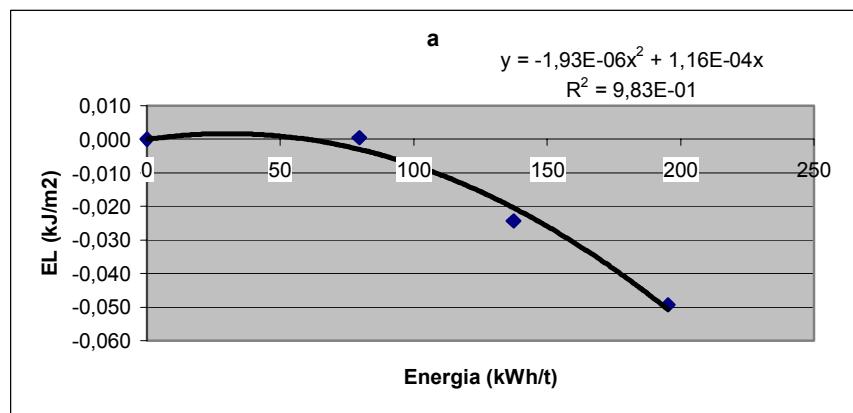
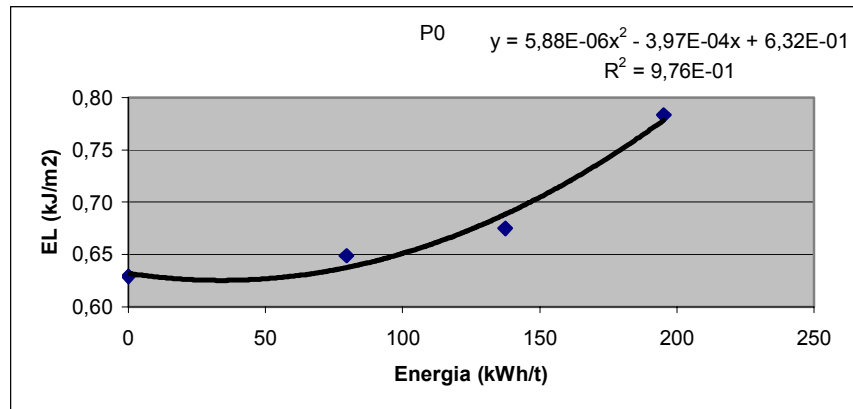
BÉTULA – R B A



PINHO – Energia da Ligação



EUCALIPTO – Energia da Ligação



BÉTULA – Energia da Ligação

