



Universitat de Girona  
Escola Politècnica Superior

## Projecte/Treball Final de Carrera

**Estudi:** Enginyeria Tècn. Ind. Química Ind. Pla 2002

**Títol:** Estudi per a la determinació de la composició òptima d'una barreja de pastes per a la fabricació de paper tripa industrial

**Document:** MEMÒRIA

**Alumne:** Isabel Jaume Sureda

**Director/Tutor:** M. Àngels Pèlach

**Departament:** Eng. Química, Agrària i Tec. Agroalimentària

**Àrea:** Enginyeria Química

**Convocatòria** (mes/any): juny/06

## **AGRAÏMENTS**

Gràcies a la meva família, que m'ha permès realitzar un somni. Gràcies per deixar-me volar.

Gràcies a totes aquelles persones que m'han aixecat quan he caigut o que no m'han deixat caure.

Gràcies a tots els que m'heu acompanyat en aquest camí.

Gràcies a tots aquells brasilers que em van fer sentir tan bé, tot i estar a milers de quilòmetres de la meva mar Mediterrània.

Gràcies a la M. Àngels Pèlach, gran tutora i immillorable persona.

Gràcies a tots dels qui me n'he emportat una part amb mi.

## ÍNDEX

	Pàgina
1. Antecedents.....	3
2. Objectiu.....	4
3. Fonaments teòrics.....	5
3.1 . El cartró ondulat.....	5
3.2 . El paper tripa.....	6
3.3 . El pi.....	6
3.3.1. Història del pi al Brasil.....	6
3.3.2. Situació actual del pi al món i al Brasil.....	9
3.4 . El sisal.....	14
3.4.1. Historia del sisal al Brasil.....	15
3.4.2. Situació actual al Brasil.....	16
4. Materials i mètodes.....	17
4.1. Materials.....	17
4.1.1. Matèries primeres.....	17
4.4.2. Equipaments.....	17
4.2. Mètodes.....	18
4.2.1. Preparació de les pastes.....	18
a) Pi i sisal.....	18
b) Retalls.....	19
c) Paper de diari.....	19
4.2.2. Caracterització de les pastes.....	21
4.2.3. Procediments.....	22
a) Càlcul del contingut d'humitat en les matèries primeres.....	22
b) Definició de les mescles estudiades.....	23
c) Realització de les mescles de les pastes cel·lulósiques.....	24
d) Formació dels fulls.....	25
e) Assecat dels fulls.....	26
f) Condicionament dels fulls.....	26
g) Assaigs químics.....	26
h) Assaigs físics.....	27
5. Resultats.....	37
5.1. Preparació de les pastes.....	37
5.2. Caracterització de les pastes.....	39
5.3. Contingut d'humitat de les pastes.....	45
5.4. Resultats dels assaigs químics.....	46

5.5. Resultats dels assaigs físics.....	47
5.6. Comparació amb el paper tripa industrial.....	65
6. Resum del pressupost.....	75
7. Conclusions.....	76
8. Relació de documents.....	78
9. Bibliografia.....	79

## **1. ANTECEDENTS**

La demanda de producció de papers d'embalatge en el mercat brasiler s'està incrementant de manera constant a causa del creixent ritme d'exportacions global del país. Els embalatges més utilitzats són les caixes de cartró ondulat (*OCC*). Aquestes caixes de cartró, un cop han estat usades, són recollides separadament per incorporar-les, de nou, a un procés de reciclatge i fabricar nous productes de cartró ondulat.

La mateixa demanda de producció creixent esdevé amb el paper de diari. Aquest producte paperer que un cop llegit es converteix en un residu, no s'acostuma a utilitzar al Brasil com a matèria primera per a la fabricació de, per exemple, noves caixes de cartró ondulat.

El paper premsa sol estar fabricat amb fibres de qualitat elevada i per tant són molt susceptibles de reintroduir-se de nou com a matèria primera per a la formació de determinats tipus de papers. Amb la utilització d'aquests materials com a alternativa es disminueix la demanda de fibres verges com són l'eucaliptus o el pi. Al Brasil, el pi es troba en una situació crítica a causa de la mala gestió de les plantacions en anys anteriors i, en l'actualitat, no es disposa de prou parc forestal per fer front a la demanda habitual.

## **2. OBJECTIU**

L'objectiu d'aquest estudi és veure com influeixen les diferents mescles de fibres verges (pi i sisal) amb fibres secundàries (retalls i paper de diari) en les propietats físiques de fulls de paper formats en laboratori, que es vol destinar a paper tripa industrial. Es coneix com a paper tripa aquella qualitat de paper utilitzada en l'interior del cartró ondulat.

A més, es pretén comparar les propietats d'un paper tripa comercialitzat industrialment, amb les propietats dels fulls obtingudes en el laboratori a partir de les mescles de les pastes cel·lulósiques de pi, sisal, retalls i paper de diari, per tal de determinar en quin cas s'assoleixen característiques similars.

### **3. FONAMENTS TEÒRICS**

L'objectiu principal d'aquest treball està centrat en una qualitat de cartrons molt específica, el cartró ondulat. Tot seguit es descriurà amb detall aquesta qualitat de cartró.

#### **3.1 El cartró ondulat**

El cartró ondulat es va començar a utilitzar en el segle XIX com un senzill material de protecció d'ampolles, joieria, flascons de vidre i fruita fresca. Ràpidament, es van ampliar les seves aplicacions fins a convertir-se en un material bàsic en l'embalatge de qualsevol tipus de producte. El seu ús està tan estès i lligat a la societat que la seva demanda és un indicador bastant precís de la situació econòmica d'una regió.

Inicialment el cartró ondulat només constava del paper ondulat o del que anomenem tripa. Ràpidament, per les seves aplicacions finals, se li va demanar que tingués molta més resistència i estabilitat dimensional, la qual cosa es va aconseguir afegint un full de paper estabilitzant que ajudava a enfortir el full ondulat, conegut posteriorment com a paper tripa. Poc després s'hi afegí un segon full o segona cara. La patent del que avui coneixem com a cartró ondulat és de l'any 1874.

Així doncs, el cartró ondulat es constitueix per un o més papers ondulats (paper tripa) fixats a un o més elements plans, mitjançant un adhesiu aplicat en la part superior de les ondes. La Figura 1 mostra clarament les diferents capes de diferents qualitats de cartró ondulat.



Figura 1: Diferents qualitats de cartró ondulat.

Per la seva composició, aquest cartró ondulat és 100% biodegradable i reciclable. (POCOVI, H.C., 1987).

## 3.2 El paper tripa

És el paper que se situa enmig de les capes externes d'una capsula de paper ondulat. És un paper de gramatge baix, sent l'estàndard de 127 g/m<sup>2</sup>, tot i que també se'n fabriquen amb gramatges de 88 a 176 g/m<sup>2</sup>.

La seva funció fonamental és la de crear un moment d'inèrcia per la resistència a la flexió molt elevat i, també, la d'oferir resistència a l'aixafament en el sentit perpendicular a la superfície. A més, cal que sigui mal·leable per poder suportar les fortes tensions i deformacions que es donen en la màquina per ondular. En canvi, l'aparença i les propietats òptiques no són rellevants en aquest tipus de paper. (PEPE, L., 2000). Per aconseguir les propietats que es descriuen anteriorment, s'utilitzen pastes cel·lulósiques de fibra llarga en la seva fabricació.

En els últims anys i cada vegada més, les fibres verges s'estan substituint per materials recuperats, com ara caixes de cartró vell, paper de diari, entre d'altres. La utilització d'aquest tipus de matèria els dona propietats idèntiques a les donades per fibres verges. A més, amb la incorporació d'aquests materials es contribueix a la reducció de la demanda de matèries primeres verges i a la reducció de residus.

## 3.3 El pi

El gènere *Pinus* comprèn més d'un centenar d'espècies i moltes d'aquestes representen matèries primeres principals per a les indústries de conversió de la fusta. A més, constitueix el principal gènere de coníferes per a la producció de cel·lulosa a tot el món.

És una espècie de creixement ràpid, la qual cosa facilita la seva explotació i, a més, la seva fibra és llarga (longitud mitjana de 2 a 5 mm), per la qual cosa és adequada per a fabricar papers que requereixen resistències altes.

### 3.3.1 Història del pi al Brasil

Segons Kronka i altres (2005), una de les raons més importants per la introducció del pi al Brasil va ser la necessitat de la producció de fusta per a elaborar fusta serrada, laminada, confecció de panells i obtenció de cel·lulosa i paper. Aquesta espècie forestal constituïa una alternativa a l'*Araucaria angustifolia* considerada una de les millors fustes del món i, a més, era sotmesa a una explotació intensa i abusiva.



Els primers estudis referents a espècies dels anomenats pins subtropicals es van fer a partir de l'any 1936 per l'actual *Instituto Florestal de Sao Paulo*, oportunitat en que van ser introduïdes les primeres llavors *P. elliottii* var. *Elliottii* i de *P.taeda* (Figura 2 i Figura 3). A partir de l'any 1955 es van començar a implantar altres espècies, com són *P. caribaea* var. *caribaea*, *P. caribaea* var. *hondurensis*. A conseqüència de les diferències entre les condicions de les regions d'origen i les condicions de les zones de introducció, moltes espècies no es van adaptar al país.



Figura 2: *Pinus taeda*

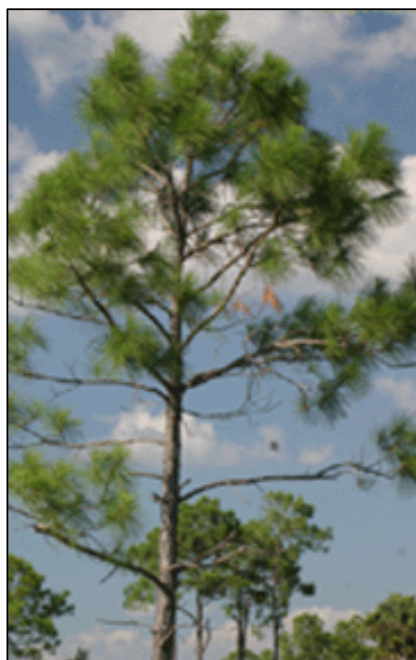
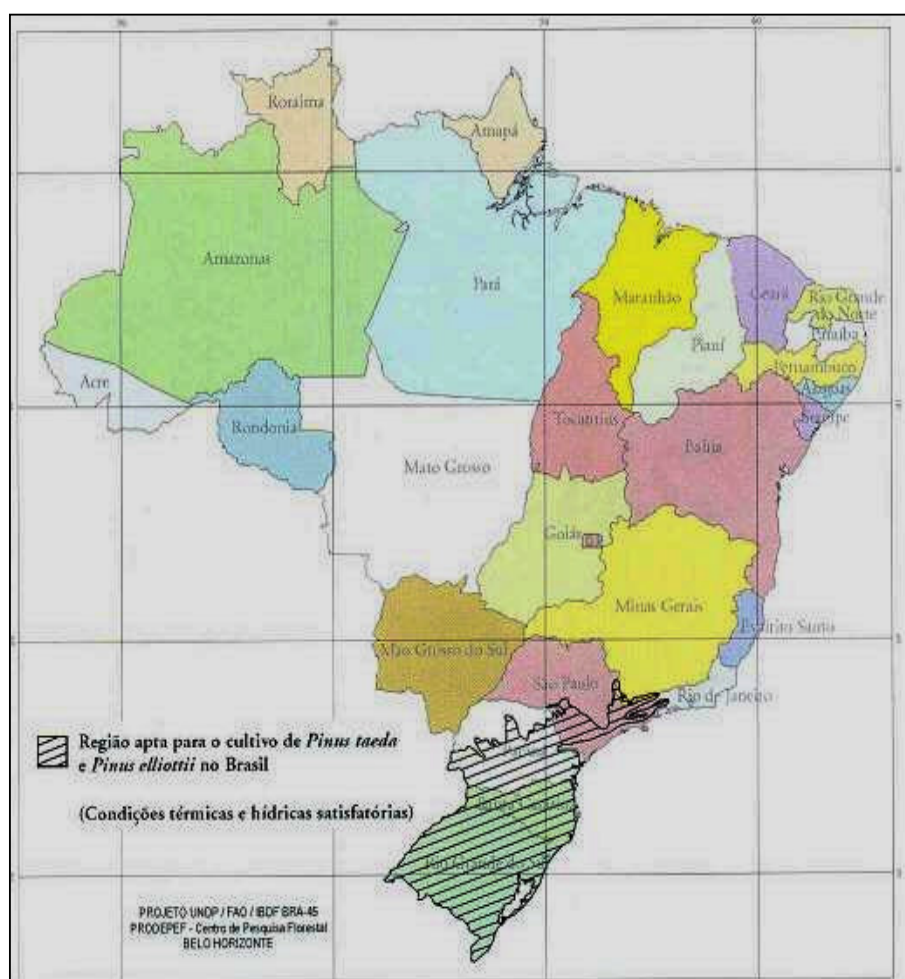


Figura 3: *Pinus elliottii*

El 1958 es plantaren unes 200 hectàrees de *P. elliotii* var. *Elliottii*, iniciant així un procés de reforestació en el qual, posteriorment, es van introduir moltes altres espècies de pi. Es van ampliar ràpidament les àrees plantades en els estats de Espírito Santo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul i en la regió central de Sao Paulo. L'èxit d'aquestes plantacions va ser gràcies a les condicions d'adaptació del pi a sòls lleugerament àcids, els quals constitueixen la majoria de sòls en el país. Això va permetre la implantació d'àrees extenses i va convertir les espècies d'aquest gènere en una valuosa font de matèria primera.

A la Figura 4 es poden observar les regions potencialment aptes per al cultiu *P. elliotii* i *P. taeda* al Brasil.



Adaptat de Golfari i altres (1978)

Figura 4. Regions potencialment aptes per al cultiu de *P. taeda* i *P. Elliottii*

### 3.3.2. Situació actual del pi al món i al Brasil

A la Taula 1 apareixen les dades corresponents a l'extensió de les plantacions de pi en el món.

Taula 1. Plantacions de pi en el món

<b>País</b>	<b>Àrea (hectàrees)</b>
<b>Amèrica del Sud</b>	
Argentina	384.000
Brasil	1.690.000
Xile	1.380.000
Colòmbia	118.000
Equador	-
Perú	14.000
Uruguai	44.000
Veneçuela	325.000
Total	3.955.000
<b>Àfrica</b>	
Àfrica del Sud	758.000
Kenya	53.000
Malawi	71.000
Marroc	199.000
Tanzània	52.000
Uganda	10.000
Zàmbia	43.000
Zimbabwe	71.000
Total	1.257.000
<b>Àsia i Oceania</b>	
Austràlia	743.000
Bhutan	10.000
Xina	7.629.000
Corea	922.000
Fiji	42.000
Índia	35.000
Indonèsia	597.000
Japó	795.000
Malàisia	5.000
Myanmar	4.000
Nova Zelanda	1.338.000
Pakistan	60.000
Filipines	100.000
Sri Lanka	17.000
Vietnam	540.000
Total	12.837.000
<b>Amèrica del Nord i Central</b>	
Cuba	183.000
Mèxic	72.000
Nicaragua	15.000
Total	270.000

Font: Bull i altres (2002)

A l'Amèrica del Sud, la distribució dels boscs de pi es concentra al Brasil, Xile, l'Argentina i l'Uruguai, amb una superfície total de 4,2 milions d'hectàrees, segons el que es mostra en la Figura 5.

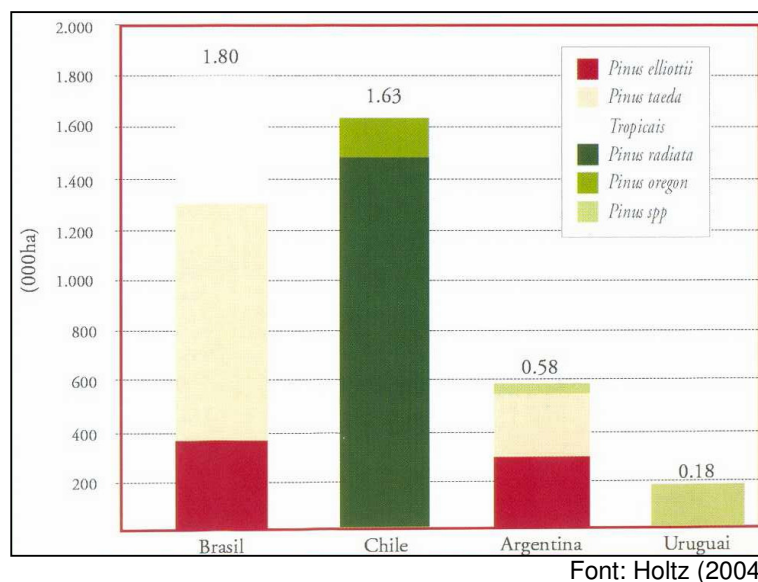


Figura 5. Distribució de les àrees plantades de pi al Brasil, Xile, l'Argentina i l'Uruguai

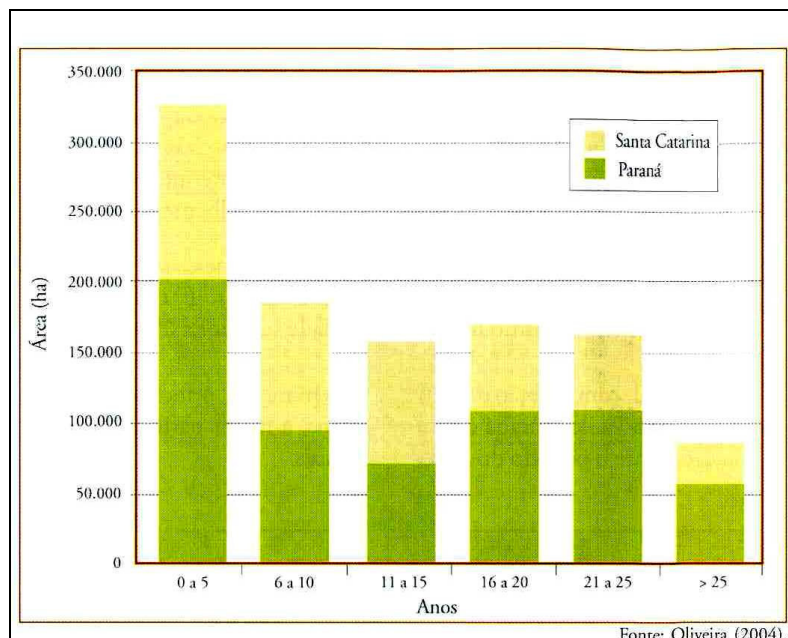
Al Brasil, els estats amb extensions majors de plantacions de pi són Paranà, Santa Catarina, Bahia i Sao Paulo, segons es mostra a la Taula 2.

Taula 2. Distribució de les àrees plantades de pi al Brasil

Estat	Hectàrees de pi
Amapá	80.360
Bahia	238.390
Mato Grosso do Sul	63.700
Minas Gerais	143.410
Parà	14.300
Paranà	605.130
Rio Grande do Sul	136.800
Santa Catarina	320.000
Sao Paulo	202.010
Altres	37.830
<b>Total</b>	<b>1.841.930</b>

Font:: SBS (2001)

Les àrees de plantació i les respectives franges d'edat del pi s'indiquen a la Figura 6. Es pot observar que les àrees majors són les que estan situades en les franges d'edat de 0 a 5 anys i de 6 a 10 anys, la qual cosa indica increments recents en les plantacions.



Font: Holtz (2004)

Figura 6. Àrees de plantació de pi segons franges d'edat en els estats de Paraná i Santa Catarina

L'Estat de Sao Paulo, d'acord amb l'*Inventario Florestal das Áreas Reflorestadas do Estado de Sao Paulo* (Kronka i altres, 2002), té a l'actualitat 158.494 ha de pi. Un aspecte important dels boscs d'aquest estat és la distribució de les edats. Segons la Taula 3, el 61,3% dels boscs amb edats conegudes tenen més de 25 anys, per tant, estan al final de procés de rotació.

Taula 3. Àrees amb espècies de pi i les respectives edats en l'Estat de Sao Paulo

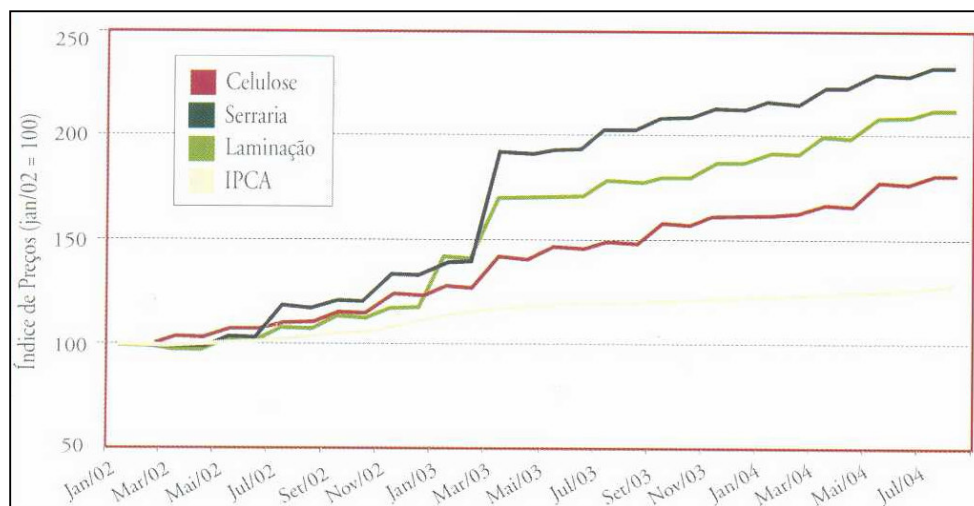
Espècie	Edat (àrea en ha)					Total
	< 5 anys	6-15 anys	16-25 anys	>25 anys	Sense inf.	
<i>P. c. bahamensis</i>	163	555	156	1.039	-	1.913
<i>P. c. caribaea</i>	263	929	1.255	3.285	27	5.759
<i>P. c. hondurensis</i>	1.754	2.709	1.216	3.892	66	9.637
<i>P. elliotii</i>	839	4.022	14.596	35.367	13.766	68.590
<i>P. oocarpa</i>	1.387	1.533	951	8.213	126	12.209
<i>P. spp</i>	15	250	906	2.459	47.925	51.555
Altres	721	2.142	889	4.817	261	8.830
<b>Total</b>	<b>5.142</b>	<b>12.140</b>	<b>19.968</b>	<b>59.073</b>	<b>62.171</b>	<b>158.494</b>

Font: Kronka i altres

(2002)

La primera generació de boscs plantats de pi està arribant a la fi. En els estats del sud, molts dels boscs ja han estat talats, aprofitats i reformats; en els altres estats, fins i tot Sao Paulo, la majoria dels boscs de pi no van ser reformats i la seva àrea està disminuint ràpidament. Es van cometre molts errors en la primera rotació de les plantacions, com ara no realitzar les podes i falta de protecció contra incendis. Això va conduir a una baixa qualitat i, com a conseqüència, a uns resultats econòmics que no van afavorir les reformes.

La falta de matèria primera ha provocat un gran augment en el preu de la fusta de pi, conforme es mostra en la Figura 7.



Font: Siqueira (2004)

Figura 7. Evolució del preu del pi

### **3.4 El sisal**

Les fulles del sisal, amb un àpex punxegut, creixen al voltant d'un bulb central, són rígides, llises i verdes. Tenen una longitud de 1'5m, i una amplada de 10 cm aproximadament. El cicle mitjà de vida del sisal comú és de 8 anys, quan la planta floreix i mor sense donar fruits.

La fibra de les fulles es destina a la indústria de corderia, tot i que també és una matèria primera excel·lent per a la fabricació de cel·lulosa, papers fins i indústria farmacèutica. Com a subproductes d'aquesta planta destaquen l'obtenció d'acetona, amoníac i cera, entre d'altres. La fibra d'aquesta planta té unes característiques atractives per a la producció de cel·lulosa gràcies a l'alt contingut de cel·lulosa i el baix percentatge de lignina. (*Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola, Sistema de Produção de Sisal, Comunicado Técnico nº 12 Nov. 1995*).

El desfibrament del sisal és l'operació més complexa i més cara de tot el procés. Al Brasil, l'extracció es realitza amb una màquina anomenada *Motor de agave* o *Máquina Paraibana*, la qual es basa en rotors raspadors d'accionament mecànic. Per la seva simplicitat, presenta una baixa capacitat operacional, produeix un gran desaprofitament de fibres (20-30% de la fibra continguda a la full) i també implica un nombre elevat d'operaris, cosa que fa que augmenti el cost de producció.

La problemàtica més important que presenta la utilització d'aquesta màquina és l'elevat risc d'accident al qual se sotmeten els treballadors, per culpa del seu disseny rudimentari i de la fatiga a causa de l'esforç que es requereix per a treballar-hi. Afortunadament, ja s'han ideat i ja estan funcionant qualcunes màquines de desfibrament automàtic que eviten aquest risc. (*Embrapa Algodão*)



En la Figura 8 es pot veure l'aparença que presenta la planta de sisal.



Figura 8. Planta de sisal

#### 3.4.1. Història del sisal al Brasil

Segons Guimaraes (1999), la planta de sisal (*Agave sisalana Perrine*) és originària del continent nord-americà i de les Illes Caraïbes. Les seves propietats són conegudes d'èpoques remotes pels habitants de Mèxic, que utilitzaven aquesta planta per nombrosos i diversos usos.

Atesa la seva facilitat d'adaptació, el sisal va ser dut del seu país d'origen a altres parts de món i va començar a cultivar-se per a ús comercial. Fins a la I Guerra Mundial, Mèxic posseïa el monopoli de mercat d'aquestes fibres. Aquesta situació va canviar quan el Dr. Henry Perrine, en la dècada de 1830, va exportar fins a Florida els primers bulbs de la planta. Des d'allà, van ser exportats més tard cap a l'Àfrica oriental i cap al Brasil.

En aquest país, el Brasil, els primers bulbs van ser introduïts a Bahia l'any 1903. No obstant això, les primeres plantacions van començar a aparèixer al voltant dels anys 1930 i 1931 i tot just el 1939 es van intensificar mitjançant camps d'experimentació i producció de mudes. A causa de canvis polítics ocorreguts en anys posteriors que no van donar suport les inversions en l'estudi d'aquestes plantacions, aquestes es van perdre i, alhora, l'economia de l'Estat de Bahia va quedar malparada.

Tot i ser coneguda des de fa molts anys i utilitzada pels indígenes de Mèxic, va ser en els anys 60 que la planta va començar a tenir una importància econòmica dins del grup de fibres vegetals i, concretament, dins del subgrup de fibres dures. Ara és la principal fibra dura produïda en el món i contribueix en l'economia del país amb més de la meitat de la producció comercial de fibres d'aquest tipus.

### **3.4.2. Situació actual al Brasil**

El Brasil és el major productor mundial de sisal. Els seus principals representants són els estats de Bahia i Paraíba, els quals són els dos majors productors del nord-est. Aquests dos estats responen amb un 97,8% de la producció brasilera de sisal (86,7% a Bahia i 11,1% a Paraíba), estant els 2,2% restants distribuïts entre els estats de Ceará, Rio Grande do Norte i Pernambuco.

A Bahia, són quasi 39 municipis els que es dediquen a aquesta activitat, que dona feina a unes 800 mil persones. Per tant, el sisal s'està convertint en un element bàsic des del punt de vista socioeconòmic. No obstant això, els problemes als quals s'enfronten els dos estats són molt semblants: manca d'orientació tècnica en la plantació i la recollida, manca d'una tecnologia de desfibrament més moderna i adient, falta d'inversions en el sector, entre d'altres.

## **4. MATÈRIALS I MÈTODES**

En aquest capítol 4 es descriuran les matèries primeres emprades en la part experimental així com les diferents metodologies experimentals i anàlisis realitzades.

### **4.1. Materials**

#### **4.1.1. Matèries primeres**

Les matèries primeres que s'utilitzen en aquest estudi són:

- Pasta de cel·lulosa sulfat no blanquejada de pi fabricada industrialment, cedida per l'empresa brasilera *ORSA S.A.*
- Pasta de cel·lulosa sulfat blanquejada de sisal fabricada industrialment, cedida per l'empresa *LWARCEL Celulose e Papel S.A.* del Brasil.
- Pasta de cel·lulosa procedent de la desagregació de caixes de paper ondulat (retalls).
- Pasta de cel·lulosa procedent de la desagregació de paper de diari col·lectat durant una setmana pel personal de l'*Agrupamento de Celulose e Papel de l'Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)* de Sao Paulo.
- Paper tripa fabricat industrialment per l'empresa *ORSA S.A.* i cedit per aquesta.

#### **4.4.2. Equipaments**

Els equipaments usats per realitzar el treball es detallen a continuació:

- Microscopi òptic marca *Carl Zeis*, calibrat a través d'una làmina mil·limetrada cada vegada que s'utilitza.
- Làmina amb regla graduada.
- Microscopi marca *Leica* model *MZAPO*, acoblat a una càmera fotogràfica digital *Samsung SSC-131* i ordinador amb software *analySIS*.
- Mesurador de grau de refinació *Schopper-Riegler*, model *SR/A*.
- Regla mil·limetrada de 30cm.
- Dinamòmetre *DI-500* per a l'assaig de tracció.
- Aparell *Mullentester* automàtic, model *MTA-2000P* per a assaig de rebentament.
- Guillotina per tallar les mostres per a l'assaig de gramatge.
- Guillotina per tallar les mostres per a l'assaig de tracció.
- Guillotina per tallar les mostres per a l'assaig de RCT-CMT.

- Aparell *Elmendorf* per a l'assaig de rasgada.
- Balança d'humitat automàtica.
- Balança semianalítica 1200g.
- Balança analítica.
- Mufla a temperatura de 525 °C i 900 °C.
- Termopar usat en la mufla.
- Estufa a temperatura constant de  $(105 \pm 2)$  °C.
- Densímetre *Gurley PGH*.
- Premsa de plat rígid *MCT 05* per a l'assaig de deformació.
- Micròmetre per a l'assaig d'espessor model 549 (paper).
- Ondulador per l'assaig de CMT.
- Aparell *Pulmac* per a l'assaig de *zero-span*, proporcionat per TMI Machine Inc, USA.
- Refinador *Valley* (molí de tipus holandès), proporcionat per TMI Machine Inc, USA.
- Desagregador de pasta cel·lulósica de la marca *REGMED*.
- Desagregador de tipus *Hidrapulper* amb hèlix lateral amb capacitat per a 20 litres.
- Desagregador per a pasta cel·lulósica amb un motor amb velocitat de 3000 rpm.
- Mesclador de pastes cel·lulósiques amb capacitat per a 10 litres.
- Formador de fulls manuals del tipus *TAPPI*.
- Premsa per a fulls.
- Assecador per a fulls manuals.
- Bomba de buit.

Els aparells i instruments detallats anteriorment es calibren de manera periòdica per diversos organismes certificats, com són el *Laboratorio de Metrologia del Centro de Metrología Mecánica* de l'*IPT*, *Regmed Industria Técnica de Precisão Ltda.* i *Mecatécnica Assistência Técnica Manutenção e Comércio Ltda.*

## **4.2. Mètodes**

### **4.2.1. Preparació de les pastes**

#### a) Pi i sisal

La preparació de les pastes de pi i de sisal no es va realitzar d'una sola vegada, sinó que es va fer en diverses tandes. El motiu per procedir d'aquesta manera va ser que, després de desagregar i refinar la primera part de pasta, es va veure que la quantitat era insuficient per realitzar tots els fulls en els quals, posteriorment, es realitzarien els assaigs. A més, després d'acabar la primera part de l'estudi, que consisteix en formar fulls a partir de

barreges de retalls, pi i sisal, es va haver de preparar més pasta per poder realitzar la segona part del treball, la qual consisteix a formar fulls a partir de mescles de paper de diari, pi i sisal.

Les pastes cel·lulósiques es van desagregar en un desagregador *Hidrapulper* durant 15 minuts, amb aigua a temperatura ambient ( $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ ) en una proporció aproximada del 4% de pasta i recollides en un sac de niló de pas de llum de 300 mesh. A continuació, les pastes es van refinar en un refinador *Valley*, segons la norma ABNT NBR 14347:1999. *Pasta cel·lulósica – Refinação em Laboratório – Método Valley*. El grau de refinació es va mesurar amb l'aparell *Schopper-Riegler*, segons indica la norma ABNT NBR 14031:2004 *Pasta cel·lulósica - Determinação da resistência à drenagem pelo aparelho Schopper-Riegler*.

Seguidament, es van barrejar les pastes preparades en primera i segona tanda ( $\text{pi}^1$  i  $\text{pi}^2$ ,  $\text{sisal}^1$  i  $\text{sisal}^2$ ) per executar la primera part del treball (mescles de retalls amb pi i sisal). La pasta preparada en tercer lloc ( $\text{pi}^3$  i  $\text{sisal}^3$ ) es va utilitzar per fer la segona part de l'estudi (mescles de paper de diari amb pi i sisal).

La consistència es va determinar segons la norma ABNT NBR 14003:1997 - *Pasta cel·lulósica - Determinação da consistência*. Per fer-ho, es van emprar un conjunt per a filtració consistent en una bomba de buit, un embut de filtració i altres elements; una balança i una estufa a temperatura constant de  $(105 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### b) Retalls

La preparació de la pasta cel·lulósica a partir de les caixes de cartró ondulat també es va realitzar en diferents tandes, pel mateix motiu explicat en el punt 3.2.1.1.

Es van separar les caixes de cartró que es trobaven en millor estat (més netes, menys humides) i se'n va retirar qualsevol tipus d'element que no fos cartró, com ara grapes, adhesius, plàstics. Les pastes cel·lulósiques de retalls es van desagregar i refinar de la mateixa manera que les pastes cel·lulósiques de pi i de sisal, segons s'explica en l'anterior punt. Seguidament, es mesclaren les pastes preparades en primer i segon lloc ( $\text{retalls}^1$  i  $\text{retalls}^2$ ) per executar la primera part del treball (mescles de retalls amb pi i sisal).

També se'n va determinar la consistència.

#### c) Paper de diari

Es va retirar del paper de diari qualsevol tipus d'element, com són grapes, paper *couché*, etc. Es separaren els fulls i es tallaren manualment en bocins, els quals es submergiren en aigua, més o menys, 24 hores. El paper de diari mullat es va desagregar de la mateixa manera que les altres pastes, segons el que es descriu en els punts anteriors. En

aquest cas no es va precisar refinar, ja que el grau de refinació obtingut ja va ser un valor suficient.

De la mateixa manera que en els casos anteriors, es va determinar la consistència de la pasta.

En les Figures 9 i 10 es pot observar un refinador *Valley* i un aparell *Schopper-Riegler* per a determinar graus de refinació, respectivament.



Figura 9. Refinador *Valley*



Figura 10. Aparell Schopper-Riegler

#### 4.2.2. Caracterització de les pastes

Es determinaren algunes característiques de les pastes cel·lulósiques de pi, sisal, retalls i paper de diari. Aquestes característiques van ser morfològiques, com ara la composició fibrosa (en el cas de les pastes recuperades de retalls i paper de diari) i les dimensions de les fibres (en el cas de les pastes de pi i sisal, les quals no són mescles d'altres fibres); i químiques, com és la determinació del número *Kappa*.

La caracterització morfològica també es va realitzar en un paper tripa fabricat industrialment, cedit per l'empresa *ORSA S.A.*.

Per determinar la composició de les pastes cel·lulósiques, aquestes es van desagregar i diluir fins obtenir una consistència suficient per a una bona dispersió de les fibres. Es prepararen les làmines segons s'indica a la norma *ABNT NBR 14132:1998 - Papel, cartão e pasta cel·lulósica - Análise da composição fibrosa - Método geral*. Aquestes làmines es van tractar amb el colorant *Graff "C"*, a base de clorit d'alumini, clorit de calci, clorit de zinc i iode. Les làmines es van observar en un microscopi òptic.

Per determinar la longitud de les fibres, aquestes es van mesurar amb ajuda d'una làmina amb regla graduada, a través d'un microscopi òptic, segons la norma *ABNT NBR*

15066:2004 – *Papel, cartão, papelão e pasta cel·lulósica – Determinação do comprimento de fibra*). Per determinar l'amplada de les fibres i l'espessor de paret es va utilitzar un microscopi, acoblat a una càmera fotogràfica digital i un software específic.

Es va realitzar la determinació del número Kappa, que indica el contingut de lignina present en la pasta cel·lulósica, segons la norma *ABNT NBR 7537:1997 – Pasta cel·lulósica – Determinação do número Kappa*. Per realitzar aquesta anàlisi, es van usar un desagregador de pasta i un agitador d'hèlix, entre altres instruments.

#### **4.2.3. Procediments**

Els procediments o mètodes emprats en el transcurs del treball són els següents:

a) Càlcul del contingut d'humitat en les matèries primeres

Pel fet de precisar aquesta dada només com a orientació per calcular la quantitat de matèria primera que ha de desagregar-se, no es va calcular seguint cap tipus de norma, sinó que es va determinar el percentatge d'humitat directament en una balança automàtica.

El contingut d'humitat del paper és la relació de la pèrdua de massa d'un cos de prova quan s'asseca en una estufa a  $(105 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  i la massa en el moment del mostreig, expressat en percentatge.

Les fibres cel·lulósiques són naturalment higroscòpiques i el medi ambient té vapor d'aigua, com a conseqüència el paper absorbeix aigua del medi ambient o perd aigua, depenent de l'equilibri d'humitat entre el paper i l'ambient. La humitat influeix en la flexibilitat de les fibres i en els lligams entre elles i, per tant, en diferents propietats del paper.



b) Definició de les mescles estudiades

La preparació de la composició en massa de les mescles estudiades va seguir un delineament *simplex* (Barros Neto i altres, 1995) , conforme apareix en les Taules 4 i 5.

Taula 4. Composició de les mescles de retalls, pi i sisal

Mescla	Composició, %		
	Retalls	Pi	Sisal
1	0	0	100
2	0	0	100
3	0	100	0
4	0	100	0
5	100	0	0
6	100	0	0
7	50	0	50
8	50	50	0
9	0	50	50
10	66,67	16,67	16,67
11	16,67	66,67	16,67
12	16,67	16,67	66,67
13	33,3	33,3	33,3
14	80	10	10
15	10	80	10
16	10	10	80

Taula 5. Composició de les mescles de paper de diari, pi i sisal

Mescla	Composició, %		
	1 Paper de diari	Pi	Sisal
1	0	0	100
2	0	0	100
3	0	100	0
4	0	100	0
5	100	0	0
6	100	0	0
7	50	0	50
8	50	50	0
9	0	50	50
10	66,67	16,67	16,67
11	16,67	66,67	16,67
12	16,67	16,67	66,67
13	33,3	33,3	33,3
14	80	10	10
15	10	80	10
16	10	10	80

c) Realització de les mescles de les pastes cel·lulósiques

Per formar els fulls manuals es va calcular el volum necessari de cada tipus de pasta per realitzar la mescla segons els percentatges descrits en l'apartat anterior.

Per obtenir fulls amb un gramatge de 120 g/m<sup>2</sup> aproximadament (com els fulls formats de manera industrial per la majoria de les empreses) era precís conèixer el contingut de massa seca en determinat volum (g/l), l'àrea del formador de fulls TAPPI (0,026507 m<sup>2</sup>) i la quantitat de fulls a realitzar a partir de cada mescla (20, en el primer conjunt de fulls formats i 16, en el segon conjunt de fulls, ja que es va percebre que eren suficients per realitzar tots els assaigs).

Els càlculs realitzats són:

◦ *Massa de cada full* :  $0,026507m^2 \cdot \frac{120g}{m^2} = 3,18084g$  massa seca

◦ *Volum de cada tipus de pasta per fer la mescla (l de massa humida)* :

$3,18084g$  m. seca · (consistència g m.seca/l) · (percentatge de pasta en la mescla) · quantitat de fulls

Una vegada calculats els volums necessaris per a cada una de les mescles, es va separar aquesta quantitat i es va abocar al dipòsit de l'agitador, en el qual s'hi va agregar aigua fins a completar 10 litres i es va agitar la mescla per homogeneïtzar-la.

Abans de procedir a formar els fulls manuals, es va determinar el grau de refinació de la mescla de pastes, seguint la norma *ABNT NBR 14031:2004 Pasta cel·lulósica - Determinação da resistência à drenagem pelo aparelho Schopper-Riegler*. A més, amb les dades obtingudes en la determinació del grau de refinació, el volum de mescla usat per a la determinació i la massa dels fulls formats, es va poder conèixer aproximadament la consistència de la mescla. Aquest valor es va utilitzar per calcular el volum necessari per a la formació de cada full.

d) Formació dels fulls

Després de calcular el volum de mescla necessari per a la formació de cada un dels fulls, aquests es van formar en un formador de fulls manuals tipus *TAPPI* (Figura 11), segons la norma *ABNT NBR 14479:2002 - Pasta cel·lulósica - Preparação de folhas em laboratório para ensaios físicos - Método do formador de folhas convencional*.

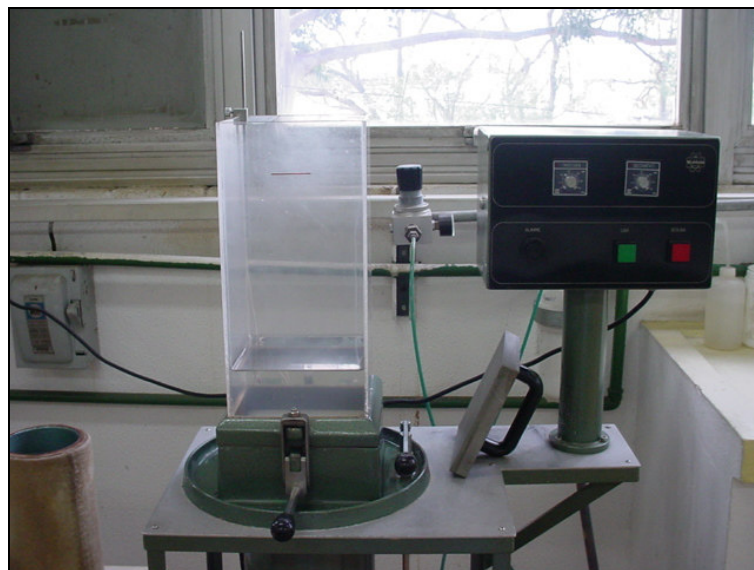


Figura 11. Formador de fulls manuals tipus *TAPPI*

e) Assecat dels fulls

En un principi, per a l'assecat dels fulls, es va procedir segons el que indica la norma corresponent, que consisteix a col·locar els fulls formats en unes plaques de ceràmica destinades a aquest ús. En altres experiències realitzades en el mateix laboratori, altres tipus de fulls s'assecaven en condicions ambientals sense cap tipus de problema; no obstant això, quan es van intentar assecar els fulls amb aquest procediment, es van arrugar per causa de la humitat ambiental.

Per tant, es van assecar en condicions ambientals, però aplicant pressió en ells, per evitar que s'hi formessin arrugues.

f) Condicionament dels fulls

Els fulls es van condicionar durant 24 hores en un ambient controlat, a 25 °C i 49% d'humitat, aproximadament, segons la norma *NBR NM ISO 187:2000-Papel, cartão e pasta cel·lulósica-Atmosfera normalizada para condicionamento e ensaio e procedimento de controle da atmosfera e condicionamento das amostras-Errata n.1/2000*.

g) Assaigs químics

A més de determinar les propietats físiques, també es va determinar el contingut de cendra en el paper format i en paper tripa industrial, dada que ofereix una bona estimació de la matèria inorgànica total present en aquest.

Les normes utilitzades per realitzar aquesta determinació són les normes *NBR 13999:2003 - Papel, cartão, pasta cel·lulósica e madeira - Determinação do residuo (cinza) após incineração a 525 °C*.i *NBR NM ISO 2144:2001 - Papel, cartão e pastes cel·lulósiques - Determinação do residuo (cinza) após incineração a 900 °C*.

El contingut de cendra està relacionat amb la quantitat de matèria inorgànica present, la qual pot procedir de la matèria primera utilitzada, del procés de fabricació de la pasta cel·lulósica i de l'addició de productes inorgànics en la fabricació del paper, entre ells la càrrega mineral.

Quan es produeix la incineració a 525 °C o a 900 °C i no hi ha canvis en els valors obtinguts i aquests són d'uns pocs tants per cent o menys, significa que aquests papers no contenen pigments o càrregues inorgàniques. Quan la incineració a 525 °C o a 900 °C dóna valors que no són considerats negligibles, això ens indica la presència de càrregues inorgàniques com ara l'òxid de silici, el caoli o diòxid de titani. D'aquesta manera, el residu de la incineració dóna una bona estimació de la matèria inorgànica total present en la mostra. (Norma TAPPI T 211 om-93, Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C)

Les cendres en un paper poden tenir una influència negativa, depenent de la composició d'aquestes. Per exemple: en la confecció de xapes de cartró ondulat, papers tripa amb alt contingut de cendres són abrasius i disminueixen la vida mitjana dels cilindres ondulators; les propietats de resistència d'un paper disminueixen amb l'augment del contingut de càrrega mineral.

#### h) Assaigs físics

Es van determinar les propietats físiques dels fulls formats segons el que indica la norma *NBR 14527:2000 – Pasta cel·lulósica – Determinação das propriedades físicas em folhas formadas em laboratório*. Els assaigs van aplicar-se en primer lloc al conjunt de mescles de les pastes de retalls, pi i sisal i, en segon lloc, al conjunt de mescles de les pastes de paper de diari, pi i sisal.

Els mateixos assaigs van aplicar-se a una mostra de paper tripa fabricat industrialment, proporcionat per l'empresa *ORSA S.A.* A partir de les dades obtingudes en els assaigs d'aquest paper, es té una referència de les propietats que ha de tenir aquest tipus de paper.

El paper tripa industrial es va assajar de manera transversal i longitudinal ja que, pel fet d'estar fabricat de manera industrial, les fibres es troben orientades segons la direcció de funcionament de la màquina formadora de paper. Per tant, com que les fibres estan orientades en una determinada direcció, al contrari dels fulls formats en laboratori, algunes propietats varien segons s'assagi el paper de manera longitudinal o transversal.

Els assaigs realitzats en els fulls són els següents (els tres últims assaigs no s'anomenen en la norma, tot i que es realitzen per obtenir més informació sobre les propietats físiques del paper format):

- **Gramatge**, segons la norma *NBR NM ISO 536:2000 - Papel e cartão - Determinação da gramatura*.

El gramatge és la massa per unitat d'àrea del paper, determinat sota condicions específiques. És una propietat molt important, ja que la producció i la conversió del paper es registren en tones. En l'estudi de les pastes cel·lulósiques, és comú expressar les propietats de resistència com a índexs, obtinguts dividint els valors d'aquestes propietats pel gramatge.

Per calcular el gramatge es van utilitzar una estufa, uns recipients adequats i una balança analítica.

Per obtenir el resultat d'aquest assaig es va realitzar el següent càlcul:

$$\text{Gramatge (g/m}^2\text{)} = \frac{\text{pes 5 fulls} \cdot \text{humitat}}{\text{àrea de full} \cdot 5 \cdot 100} \quad (\text{Eq.1})$$

• **Espessor**, a partir d'aquest i del gramatge, es pot calcular la densitat aparent i el volum específic aparent; segons la norma *NBR NM ISO 534-2000 - Papel e cartão - Determinação da espessura e da densidade aparente de uma única folha ou de um maço - Errata / 2003*.

L'espessor és una propietat important en l'ús i conversió del paper. L'espessor aparent, que és l'espessor d'un únic full, és la distància entre les dues cares del paper. Molts factors afecten aquesta propietat, entre ells podem citar: el gramatge del paper, la quantitat de pressió a la que es sotmet durant la fabricació, l'addició de materials i el tipus de fibra emprat.

La densitat d'un full de paper és la massa per unitat de volum, sent el quocient entre el gramatge i l'espessor del full. S'expressa en g/cm<sup>3</sup>. El volum específic és el volum per unitat de massa, sent a l'invers de la densitat, és a dir, el quocient entre l'espessor i el gramatge. S'expressa en cm<sup>3</sup>/g. La densitat i el volum específic estan relacionats amb els espais buits del paper, per aquest motiu les propietats físiques, elèctriques, òptiques i d'absorció del paper depenen d'aquests paràmetres. Tot i que no hi ha diferència qualitativa entre ells, és més convenient utilitzar el volum específic, ja que és usat tradicionalment i els seus valors poden ser correlacionats immediatament amb altres propietats del paper.

Per fer aquesta determinació es va emprar un micròmetre

• **Propietats de tracció**, segons la norma *NBR NM ISO 1924-2:2001 - Papel e cartão – Determinação das propriedades de tração – Método da velocidade de constante alongamento*.

Les propietats de resistència a la tracció estan relacionades principalment amb la capacitat del paper per sustentar-se sota condicions específiques. L'índex de tracció és un paràmetre que relaciona la resistència a la tracció amb la massa del paper.

Les mostres es van tallar conforme les mides establertes per la norma amb una guillotina específica. Per determinar aquestes propietats es va usar un dinamòmetre.

Per obtenir el resultat de l'assaig es va realitzar el següent càlcul:

$$\text{Índex de tracció (kNm/kg)} = \frac{\text{força mitjana(kgf)} \cdot 1000 \cdot 9,8067}{\text{gramatge} \cdot 15} \quad (\text{Eq.2})$$

L'allargament és l'augment de la longitud de la tira de paper, fins al punt de ruptura, expressat en percentatge en relació a la longitud original. L'energia absorbida en la tracció és la quantitat de treball que es requereix per rompre la tira de paper. Alguns factors que influeixen en la resistència a la tracció són: direcció de fabricació del paper, càrrega del paper, degradació de la fibra, grau de lligam entre les fibres.

A la Figura 12 es pot observar un detall de l'assaig de tracció.

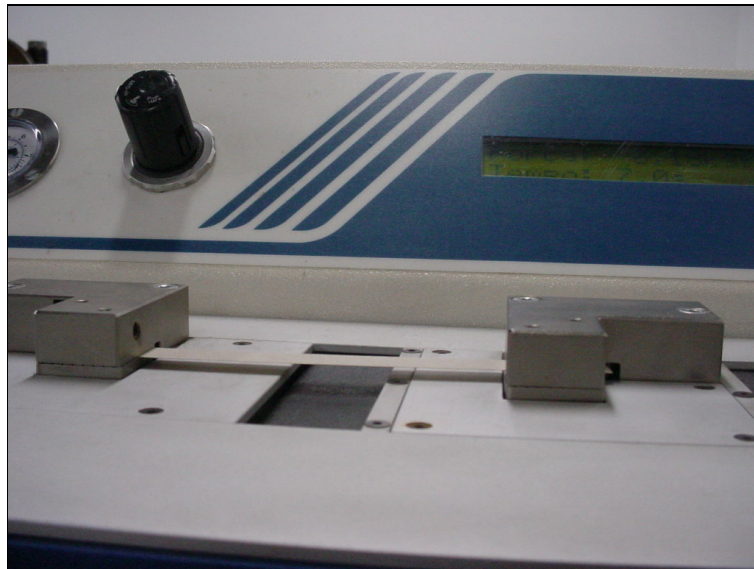


Figura 12. Detall de l'assaig de tracció

• **Resistència a la rasgada** (índex de rasgada), segons la norma *NBR NM ISO 1974:2001 – Papel – Determinação da resistência ao rasgo*.

La resistència a la rasgada és la força mitjana requerida per continuar la rasgada, a partir d'un tall inicial. L'índex de rasgada és el valor de la resistència a la rasgada dividit pel gramatge. S'expressa en  $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ .

Alguns factors que influeixen en la resistència a la rasgada són la longitud de les fibres (les llargues donen valors de resistència majors que les curtes), l'orientació i la resistència de les fibres (les menys desagregades duen a valors majors), grau de lligam entre elles (les pastes refinades duen a valors majors de rasgada) i gramatge del paper.

L'assaig es va realitzar amb un aparell anomenat *Elmendorf* (Figura 13).



Figura 13. Aparell *Elmendorf*

Per obtenir el resultat de l'assaig es va realitzar el següent càlcul:

$$\dot{I}.rasgada (mN \cdot m^2 / g) = \frac{\text{mitjana 5 valors} \cdot 16}{n. \text{ fulls} \cdot \text{gramatge}} \cdot 100 \quad (\text{Eq.3})$$

• **Resistència al rebentament** (índex de rebentament), segons la norma *NBR NM ISO 2758:2001 - Papel – Determinação da resistência ao arrebatamento*.

La resistència al rebentament és la pressió màxima que un únic full de paper pot suportar sota condicions d'assaig. Aquesta pressió és uniformement distribuïda i aplicada perpendicularment a la superfície del paper. Aquest paràmetre no depèn de la direcció de la fabricació del paper i, normalment, tampoc depèn del costat del paper on es realitzi l'assaig; però sí que depèn del tipus de fibra present en el paper, del gramatge, de la formació i, de manera directa, del lligam entre les fibres.



Per fer aquest assaig es va emprar l'aparell *Mullentester* automàtic, model MTA-2000P (Figura 14).



Figura 14. Aparell *Mullentester* automàtic, model MTA-2000P

Per obtenir el resultat d'aquest assaig es va realitzar el següent càlcul:

$$\dot{I}. \text{explosió} \text{ (kPa} \cdot \text{m}^2 \text{ / g)} = \frac{\text{pressió mitjana}}{\text{gramatge}} \quad (\text{Eq.4})$$

· **Permeabilitat a l'aire**, segons la norma *NBR NM ISO 5636/5:2001 - Papel e Cartão - Determinação da Permeância ao ar Gurley*.

La permeabilitat a l'aire és el flux mig d'aire, sota condicions específiques, que passa a través d'una unitat d'àrea del paper, en una determinada unitat de diferència de pressió i en una determinada unitat de temps. S'expressa en  $1 \text{ ml / (m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s)}$ . La permeabilitat a l'aire depèn del nombre, mida, forma i distribució dels porus del paper, per tant, no és una mesura de porositat.

Aquest assaig es va realitzar amb un densímetre *Gurley PGH* (Figura 15).

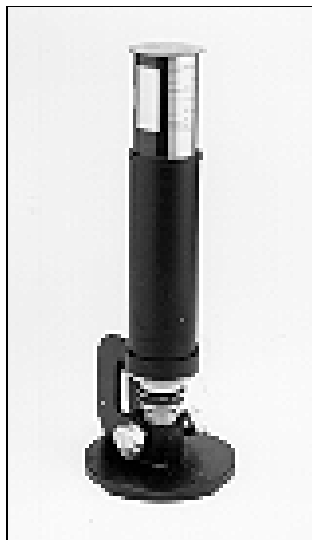


Figura 15. Densímetre *Gurley PGH*

- **Resistència a la compressió** (RCT), segons la norma *NBR 14260:2005 - Papel e cartão - Determinação da resistência ao esmagamento de anel*.

Les mostres es van tallar conforme les mides establertes per la norma amb una guillotina específica i es van col·locar en un instrument ideat per fer aquest assaig, el qual es va dur a terme amb una premsa de plat rígid *MCT 05*.

El resultat d'aquest assaig és la mesura de deu valors calculats de la següent forma:

$$RCT (kN/m) = resultat\ assaig \cdot 0,0644 \quad (Eq.5)$$

A la Figura 16 es pot observar com es va preparar el cos de prova per a l'assaig.



Figura 16. Cos de prova en el assaig RCT

A la Figura 17 s'observa la manera com es va realitzar l'assaig.

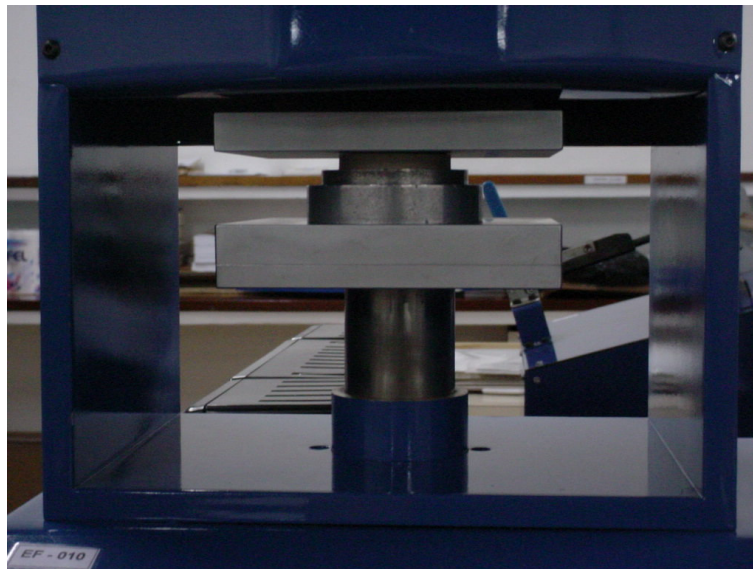


Figura 17. Assaig RCT

- **Resistència a la compressió** (CMT), segons la norma NBR 9159:2005 - *Papel para miolo – Determinação da resistência à esmagamento quando ondulado em laboratório (CMT)*.

Les mostres es van tallar conforme les mides establertes per la norma amb una guillotina específica i es van preparar amb un ondulator. L'assaig es va fer amb una premsa de plat rígid *MCT 05*.

El resultat d'aquest assaig és la mitjana de deu valors calculats de la següent manera:

$$CMT (N) = resultat\ assaig \cdot 9,8067 \quad (Eq.6)$$

Les Figures 18 i 19 mostren la preparació del cos de prova i la realització de l'assaig CMT.



Figura 18. Preparació del cos de prova per a l'assaig de CMT

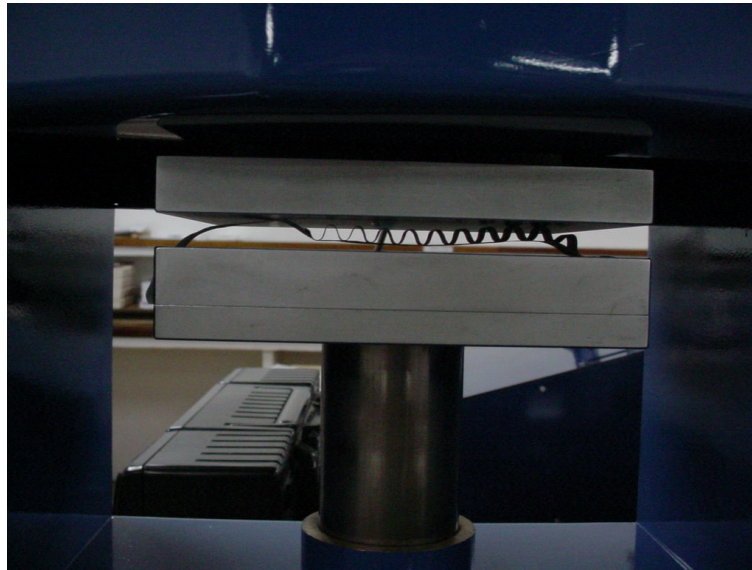


Figura 19. Assaig CMT

· **Zero-span**, en aquest cas es van utilitzar les instruccions de l'instrument utilitzat (*Pulmac Trouble Shooter*).

L'assaig de tracció *zero-span* consisteix en la determinació del valor de tracció quan es té un espai entre les garres igual a zero. D'aquesta manera, es pot mesurar la resistència individual de les fibres, a diferència de l'assaig de tracció comú. Els valors de tracció *zero-span* s'expressen en kN/m.

Les mostres es van tallar conforme les mides establertes per la norma amb una guillotina específica. L'assaig es va realitzar amb l'aparell *Pulmac Trouble Shooter*.

El resultat de l'assaig és la mitjana de deu valors calculats de la següent forma:

$$\text{Zero - span (kN / m)} = (\text{resultat assaig} - 1,8) \cdot 0,369 \cdot 0,65378 \quad (\text{Eq.7})$$

A la Figura 20 s'observa, en detall, com es va realitzar l'assaig de *zero-span*.

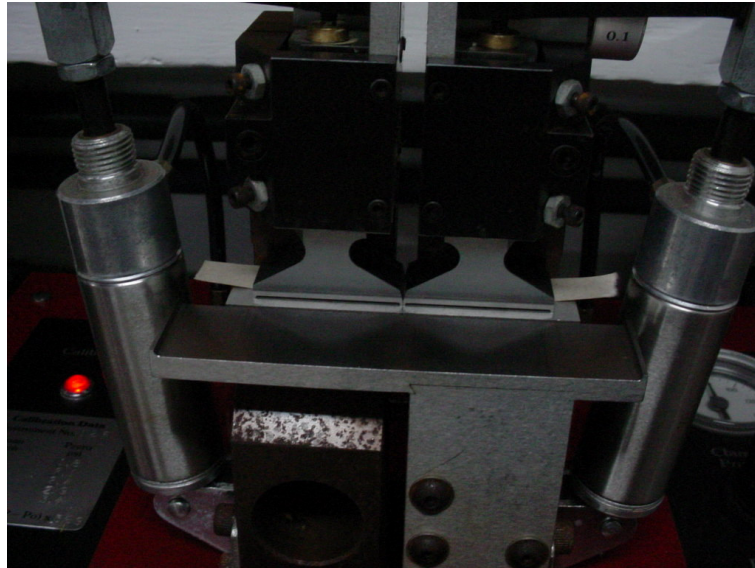


Figura 20. Detall de l'assaig de *zero-span*

## 5. RESULTATS

### 5.1. Preparació de les pastes

Com s'ha comentat en el capítol anterior, per preparar les pastes, aquestes es van refinar i se'n va determinar el grau de refinació.

Les pastes es van refinar fins obtenir un grau de refinació entre 30 i 40 °SR. Si el resultat es troba entre aquests dos valors, ens assegurem que les fibres estan prou obertes per a poder-se entrellaçar entre elles.

A la Taula 6, es poden observar els resultats de la determinació del grau de refinació. Tal com s'ha comentat en el capítol anterior, les pastes de pi i de sisal es van refinar en tres tandes i la pasta cel·lulósica obtinguda a partir dels retalls en dues. En canvi, la pasta procedent del paper de diari recuperat no va precisar refinació, ja que el valor del grau de refinació es trobava al voltant de 59,5 °SR.

A l'annex A es poden veure totes les dades a partir de les quals s'han obtingut aquests resultats.

Taula 6. Resultats de la determinació del grau de refinació

	Pi			Sisal			Retalls		P. de diari
	1	2	3	1	2	3	1	2	1
Temps de refinació (min)	105	60	170	45	30	75	5	5	0
Grau de refinació (°SR)	37	31,5	30,5	36	37,5	36	34	34,25	59,5

La Figura 21 representa l'evolució del grau de refinació enfront del temps.

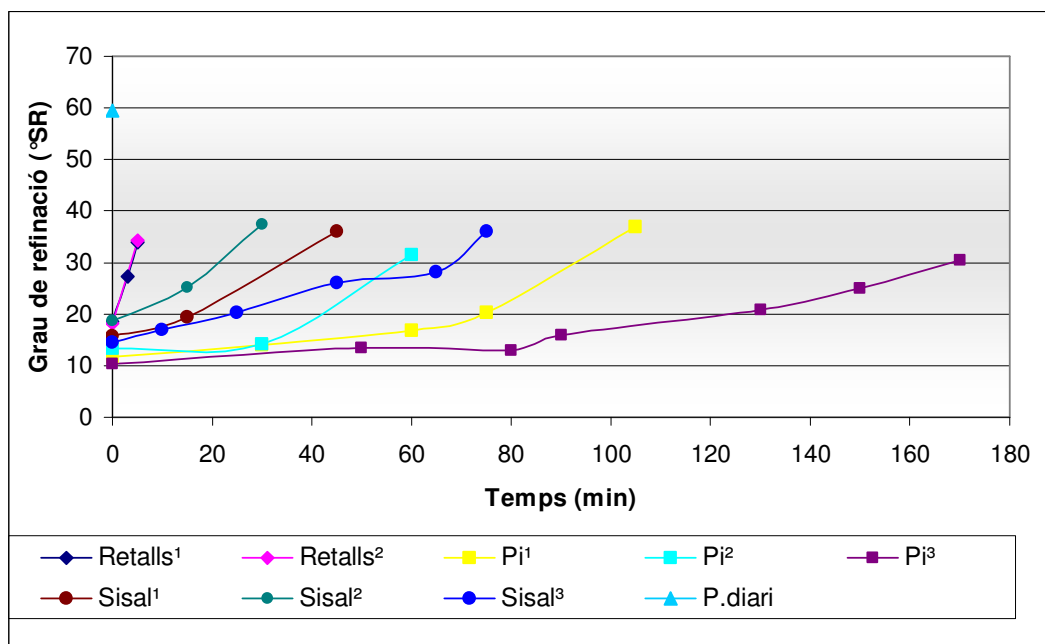


Figura 21. Evolució del grau de refinació

Com s'hi pot observar, les pastes de pi obtingudes en tres tandes de refinació presenten progressions ben diferents, tot i que partien d'un grau força similar. Aquestes pastes van necessitar diferents temps de refinació per aconseguir un valor comprès entre 30 i 40 °SR.

També ens mostra que les pastes de sisal partien d'un grau de refinació quasi idèntic i que segueixen una evolució molt semblant.

A més, es veu que les pastes de retalls, que partien també d'un grau de refinació gairebé igual, només van necessitar cinc minuts per ser desagregades i obtenir-ne el valor desitjat.

Finalment, s'observa que no va caldre refinar la pasta de paper de diari.

El fet que s'hagués de refinar les dues primeres pastes (pi i sisal) més temps que les altres dues és totalment raonable. Les fibres de pi i de sisal eren fibres verges que no havien patit cap tipus de tractament mecànic, per tant, les fibres estaven intactes. En canvi, les altres dues pastes (retalls i paper de diari) provenien de material recuperat i les seves fibres ja havien passat per tractament mecànics en anteriors fabricacions.



## 5.2. Caracterització de les pastes

La caracterització de les pastes va consistir en determinar la composició fibrosa de les pastes que contenen barreja de fibres, les dimensions de les fibres de les pastes de pi i de sisal i el número *Kappa*.

En les Figures 22, 23 i 24 es poden observar les fotomicrografies realitzades per tal de determinar la composició fibrosa de les pastes cel·lulósiques de retalls, paper de diari i paper tripa industrial, respectivament. La resta de fotomicrografies realitzades apareixen en la versió digital d'aquest document, en l'annex B.



Figura 22. Fotomicrografia de les fibres de retalls (100x)

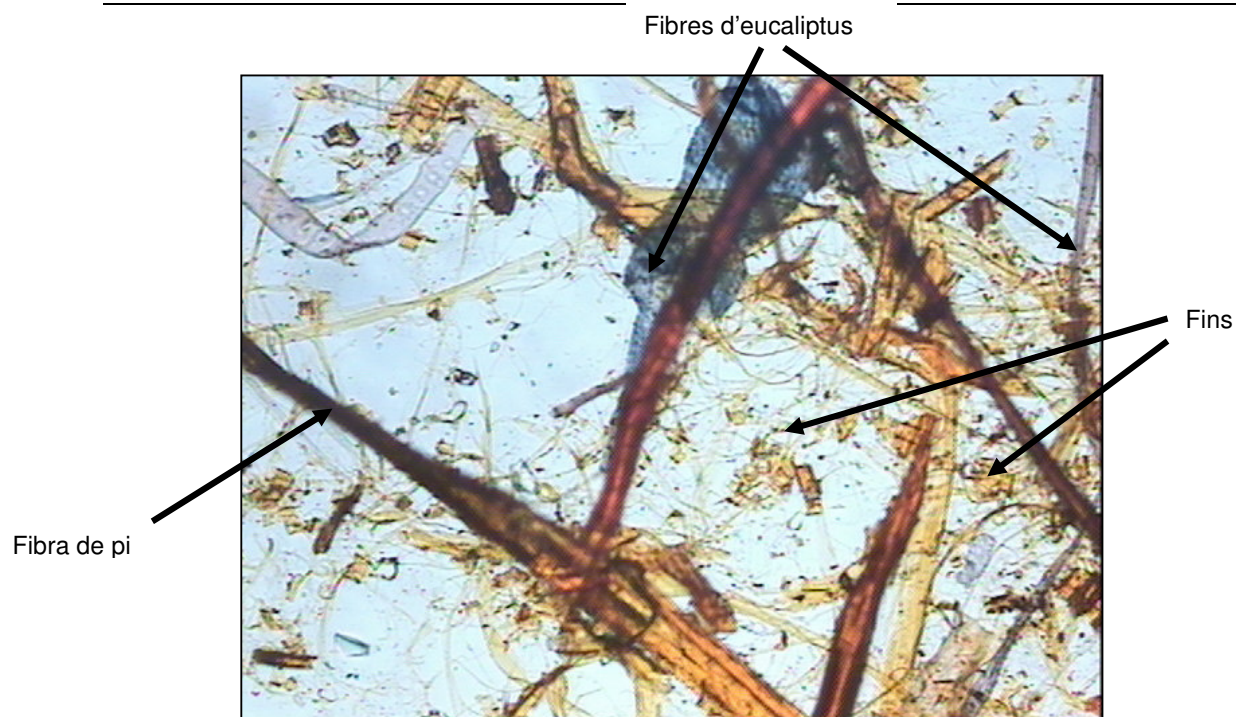


Figura 23. Fotomicrografia de les fibres de paper de diari (100x)

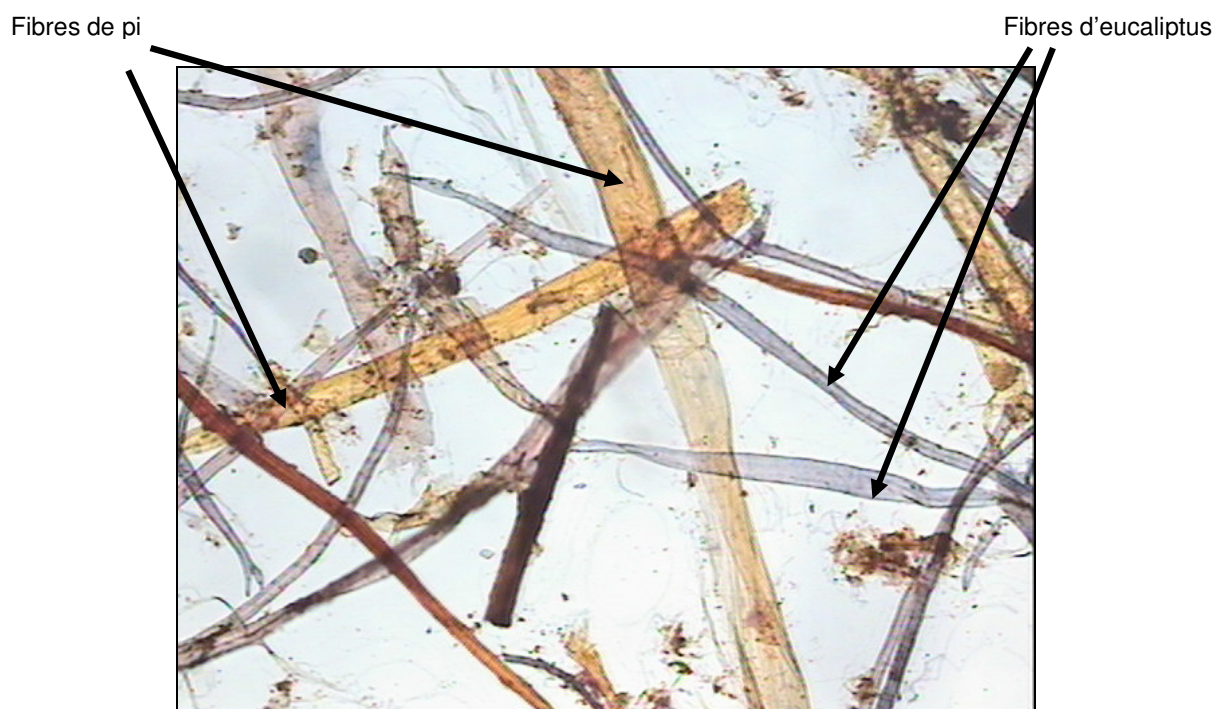


Figura 24. Fotomicrografia de les fibres de paper tripa industrial (100x)

En les fotomicrografies corresponents al retalls i al paper tripa industrial es pot veure que hi ha presència de fibres de pi i d'eucaliptus. En la fotomicrografia del paper de diari es veu que està compost per fibres de pi i que hi ha molta presència de fins.

Les Figures 25, 26, 27 i 28 mostren l'aparença de les fibres de pi, sisal, eucaliptus i bambú. Coneixent com és aquesta, es van poder identificar quines eren les fibres presents en les pastes de retalls, paper de diari i en paper tripa industrial



Figura 25. Fotomicrografia de les fibres de pi (100x)

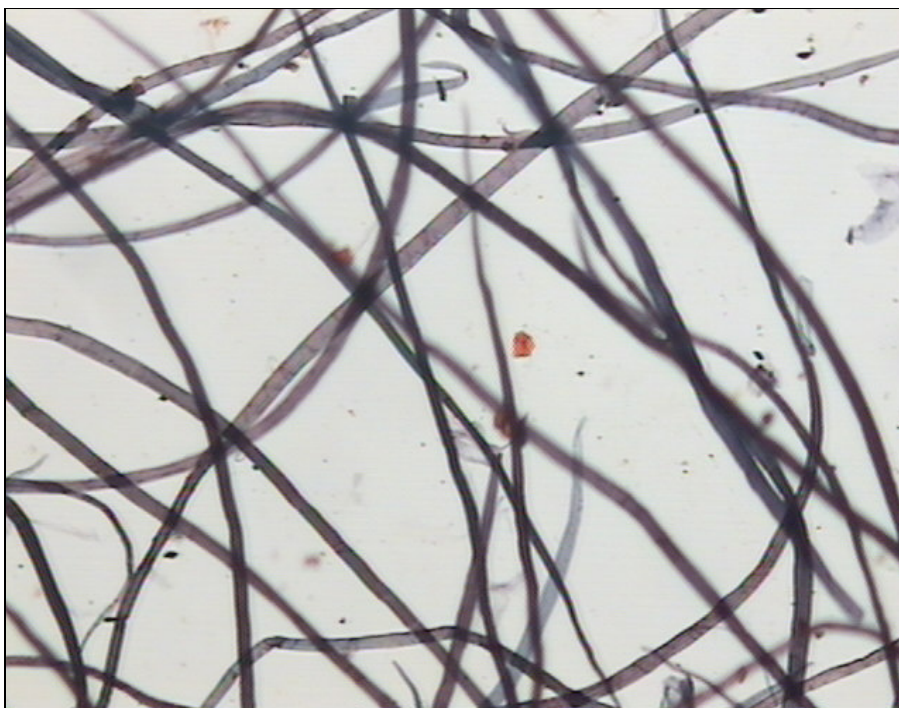


Figura 26. Fotomicrografia de les fibres de sisal (100x)

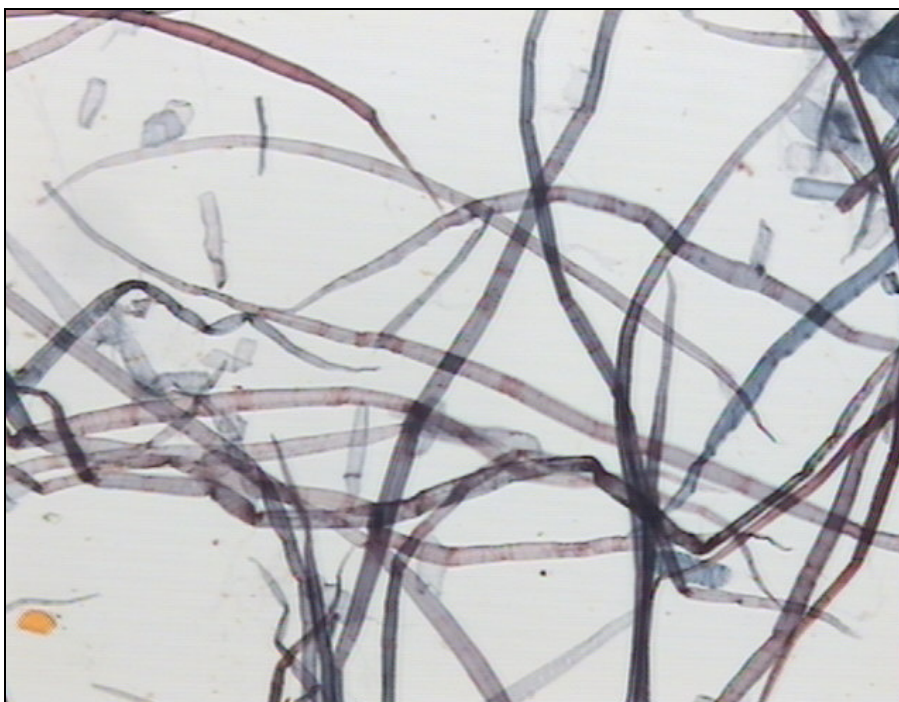


Figura 27. Fotomicrografia de les fibres d'eucaliptus (100x)

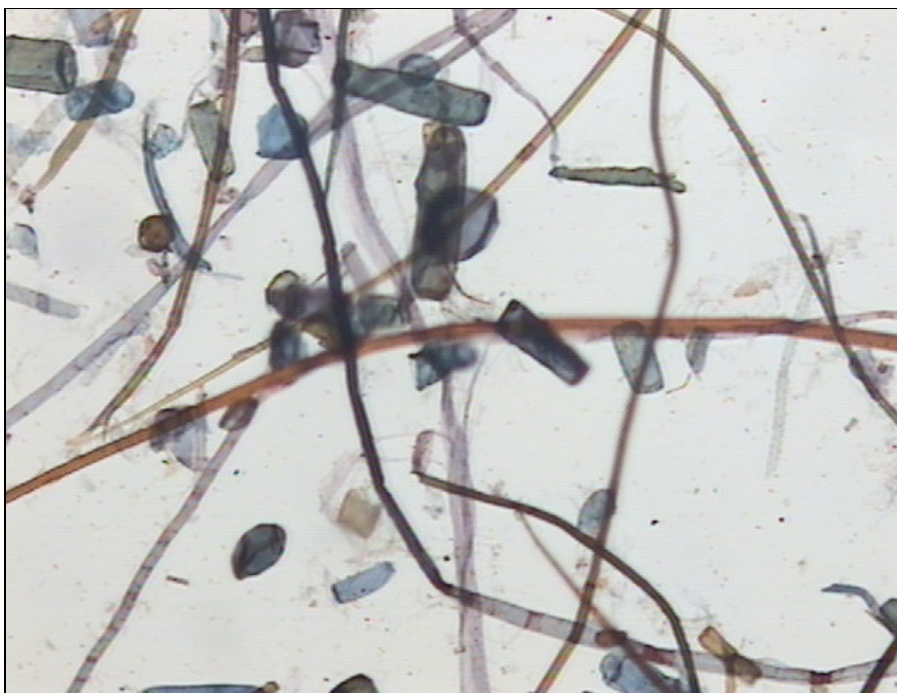


Figura 28. Fotomicrografia de les fibres de bambú (100x)

Els resultats de la determinació de les dimensions de les fibres es presenten a la Taula 7. A l'annex A es poden veure totes les dades a partir de les quals s'han obtingut aquests resultats.

Taula 7. Resultats de la determinació de les dimensions de les fibres de pi i sisal

	Pi	Sisal
<b>Longitud (mm)</b>	2,7 (0,9)	2,5 (0,9)
<b>Amplada total (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	41,7 (10,9)	15,5 (3,5)
<b>Amplada del lumen (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	29,1 (12,9)	6,1 (2,9)
<b>Amplada de paret (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	6,3 (2,5)	4,7 (1,1)

\*Els valors entre parèntesis corresponen a la desviació estàndard

Es pot observar que la llargada dels dos tipus de fibres és similar i que està al voltant de 2,5 mm, per tant, es pot dir que es tracta de fibres llargues.

Pel que fa a l'amplada, s'ha de diferenciar entre l'amplada total de la fibra, l'amplada del lumen, que correspon a la part interior de la fibra, i l'amplada de la paret, que correspon a la meitat de la diferència entre l'amplada total i l'amplada del lumen. La fibra de sisal té una amplada total i de lumen molt menor que la del pi. Tot i que l'amplada de paret dels dos tipus de fibra és força similar.

Les Figures 29 i 30 representen les fotomicrografies emprades per a realitzar les mesures d'amplada, amb l'ajuda del software *analySIS*.



Figura 29. Fotomicrografia de les fibres de pi (400x)



Figura 30. Fotomicrografia de les fibres de sisal (400x)

Els resultats de la determinació del número *Kappa* apareixen a la Taula 8. Com es comenta en el capítol anterior, aquest valor representa el contingut de lignina present en les pastes.

A l'annex A es poden veure totes les dades a partir de les quals s'han obtingut aquests resultats.

Taula 8. Resultats de la determinació del número *Kappa*

	<b>Pi</b>	<b>Sisal</b>	<b>Retalls</b>	<b>P. diari</b>
<b>Número <i>Kappa</i></b>	81,9 (5,5)	14,6 (5,6)	137,6 (4,0)	98,9 (1,4)

\*Els valors entre parèntesi corresponen a la desviació estàndard

A la taula anterior s'observa la diferència entre els números *Kappa* de les pastes.

La pasta de sisal ha estat sotmesa a processos químics (*kraft* i blanquejament), els quals han reduït notablement el contingut de lignina, la qual cosa justifica el valor baix del número *Kappa*.

La pasta de pi, que també ha patit el procés químic *kraft*, presenta un valor major que la pasta de sisal però menor que les altres dues pastes. Aquest fet es dona a causa de que sí que ha patit processos químics, però no ha estat blanquejat, a diferència de la pasta de sisal i, per tant, no ha perdut tot el contingut de lignina.

D'altra banda, la pasta de retalls només ha estat processada de manera mecànica, la qual cosa implica que conservi la lignina i doni un número *Kappa* molt més alt.

Finalment, es veu que la pasta de paper de diari i el pi tenen uns números *Kappa* molt semblants. Si es té en compte que el paper de diari conté fibres de pi, és raonable que els resultats de les dues pastes siguin semblants.

### 5.3. Contingut d'humitat de les pastes

Els resultats de l'assaig del contingut d'humitat apareixen a continuació, a la Taula 9.

Taula 9. Resultats de l'assaig del contingut d'humitat

	<b>Pi</b>			<b>Sisal</b>			<b>Retalls</b>		<b>P. diari</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Humitat (%)	9,93	10,11	10,54	11,39	11,39	9,2	11,31	11,31	11,84
Mitjana (%)	10,19			10,66			11,31		

Com es veu a la taula anterior, tots els valors són similars, al voltant de 10% d'humitat. Aquestes valors són raonables, ja que totes les pastes van ser desagregades al 4% de consistència i després va ser tamisades amb un sac de 300 mesh. De totes maneres, com s'explica en el capítol 5, els resultats d'aquesta determinació només s'utilitza com a orientació per calcular la quantitat de pasta que es precisa per a la formació dels fulls amb un determinat gramatge (120 g/m<sup>2</sup>).

#### 5.4. Resultats dels assaigs químics

A la taula 10 apareixen els resultats del contingut de cendres a 525 °C i a 900 °C dels fulls formats i del paper tripa industrial.

A l'annex A es poden veure totes les dades a partir de les quals s'han obtingut aquests resultats.

Taula 10. Contingut de cendres dels fulls formats i del paper tripa industrial

Mescla	Conjunt de mescles				Paper tripa industrial	
	Retalls - Pi - Sisal		P. diari -Pi -Sisal		Cendres a 525°C (%)	Cendres a 900°C (%)
	Cendres a 525°C (%)	Cendres a 900°C (%)	Cendres a 525°C (%)	Cendres a 900°C (%)		
<b>1</b>	0,92	0,83	1,51	1,18	5,332	4,97
<b>2</b>	0,74	0,66	1,43	1,15		
<b>3</b>	0,81	0,65	0,97	0,69		
<b>4</b>	0,85	0,71	0,95	0,68		
<b>5</b>	4,92	4,65	2,26	2,08		
<b>6</b>	4,91	4,65	2,27	2,05		
<b>7</b>	2,80	2,65	1,86	1,39		
<b>8</b>	2,27	2,07	1,51	1,33		
<b>9</b>	0,76	0,64	0,83	0,68		
<b>10</b>	3,26	3,04	1,97	1,54		
<b>11</b>	1,18	1,12	0,79	0,76		
<b>12</b>	1,17	1,13	0,89	0,83		
<b>13</b>	1,77	1,65	1,28	1,08		
<b>14</b>	3,86	3,66	29,5	29,5		
<b>15</b>	1,03	0,95	0,91	0,85		
<b>16</b>	2,80	0,77	0,95	0,91		

En els resultats de la taula es pot veure una diferència notable entre els resultats de les mostres 1, 2 (corresponents als fulls formats a partir de sisal), 3 i 4 (corresponents als fulls formats a partir de pi) i les 5 i 6 (que corresponen a fulls formats només per retalls en el primer conjunt de barrejes, i per paper de diari en el segon conjunt). En els fulls en què no hi ha



presència de retalls ni paper de diari, el valor se situa per sota del 1,51% de cendres, ja que només contenen matèria orgànica.

El paper tripa industrial presenta un alt percentatge de càrregues, així com els fulls formats a partir de retalls.

### **5.5. Resultats dels assaigs físics**

En les taules següents, les taules 11, 12, 13, i 14 apareixen els resultats dels assaigs físics realitzats en els conjunts de barreges de sisal, pi, retalls i paper de diari.

A l'annex A es poden veure totes les dades a partir de les quals s'han obtingut aquests resultats. També apareixen a l'annex els fulls de resultats dels assaigs de RCT i CMT.

Taula 11. Resultats dels assaigs físics del primer conjunt de mescles

Mescla	Percentatge de pasta cel·lulósica			Grau de refinació (°SR)	Gramatge (g/m <sup>2</sup> )	Espessor (mm)	Densitat ap. (g/cm <sup>3</sup> )	Volum esp. ap. (cm <sup>3</sup> /g)	Í. tracció (kNm/kg)	Allargament (%)	Zero-span (kN/m)
	Retalls	Pi	Sisal								
1	0	0	1	30	128	0,240	0,53	1,88	58,6	5,9	14,57
2	0	0	1	30,25	135	0,240	0,56	1,79	55,9	4,4	16,26
3	0	1	0	24	120	0,194	0,62	1,61	64,6	4,4	13,06
4	0	1	0	23,75	127	0,233	0,55	1,83	58,8	4,5	13,67
5	1	0	0	32,75	117	0,234	0,50	1,98	31,5	2,9	9,89
6	1	0	0	31,5	129	0,244	0,53	1,89	32,3	3,1	10,26
7	50	0	50	29,25	115	0,250	0,46	2,16	43,5	4,6	12,21
8	50	50	0	30,5	129	0,240	0,54	1,85	50,1	4,3	12,89
9	0	50	50	26,75	131	0,215	0,61	1,64	61,3	4,9	15,81
10	66,67	16,67	16,67	29,5	130	0,225	0,58	1,74	41,6	3,5	11,99
11	16,67	66,67	16,67	28,5	126	0,218	0,58	1,72	57,5	4,7	13,35
12	16,67	16,67	66,67	25,75	123	0,213	0,58	1,74	63,9	4,5	14,92
13	33,33	33,33	33,33	27	125	0,214	0,59	1,71	53,9	4,1	14,61
14	80	10	10	30	127	0,219	0,58	1,73	41,5	3,2	11,88
15	10	80	10	25,5	132	0,212	0,63	1,60	60,7	3,9	15,32
16	10	10	80	28	127	0,200	0,63	1,58	64,8	4,9	15,27

Taula 12. Resultats dels assaigs físics del primer conjunt de mescles (continuació)

Mescla	Percentatge de pasta cel·lulósica			Í. rasgada (mN.m <sup>2</sup> /g)	Í. rebertament (kPa.m <sup>2</sup> /g)	RCT (kN/m)	Treball (J)	Energia en la tracció (J/m <sup>2</sup> )	Í. energia en la tracció (J/kg)	CMT (N)	Permeabilitat a l'aire (ml / m <sup>2</sup> .Pa.s)
	Retalls	Pi	Sisal								
1	0	0	1	381	6,77	1,19	0,437	291	2,27	293	4,5
2	0	0	1	329	6,13	1,38	0,338	225	1,66	296	2,99
3	0	1	0	184	6,39	1,01	0,347	231	1,92	173	0,43
4	0	1	0	207	6,02	1,04	0,334	223	1,75	235	0,36
5	1	0	0	84,2	2,15	0,73	0,11	73,6	0,63	131	2,55
6	1	0	0	87,9	2,26	0,81	0,135	89,9	0,69	148	1,57
7	50	0	50	235	3,89	0,8	0,237	158	1,37	172	4,24
8	50	50	0	136	4,28	1,19	0,282	188	1,46	191	0,7
9	0	50	50	267	6,36	1,35	0,384	256	1,96	242	0,71
10	66,67	16,67	16,67	143	3,29	0,79	0,192	128	0,99	160	0,65
11	16,67	66,67	16,67	217	5,34	1,27	0,341	227	1,80	209	0,71
12	16,67	16,67	66,67	291	5,32	1,26	0,355	237	1,93	211	1,39
13	33,33	33,33	33,33	223	5,03	1,18	0,279	186	1,49	198	0,72
14	80	10	10	118	2,75	0,9	,0175	117	0,92	164	1,29
15	10	80	10	197	5,61	1,57	0,316	211	1,59	230	0,39
16	10	10	80	352	7,48	1,28	0,402	268	2,11	221	0,71

Taula 13. Resultats dels assaigs físics del segon conjunt de mescles

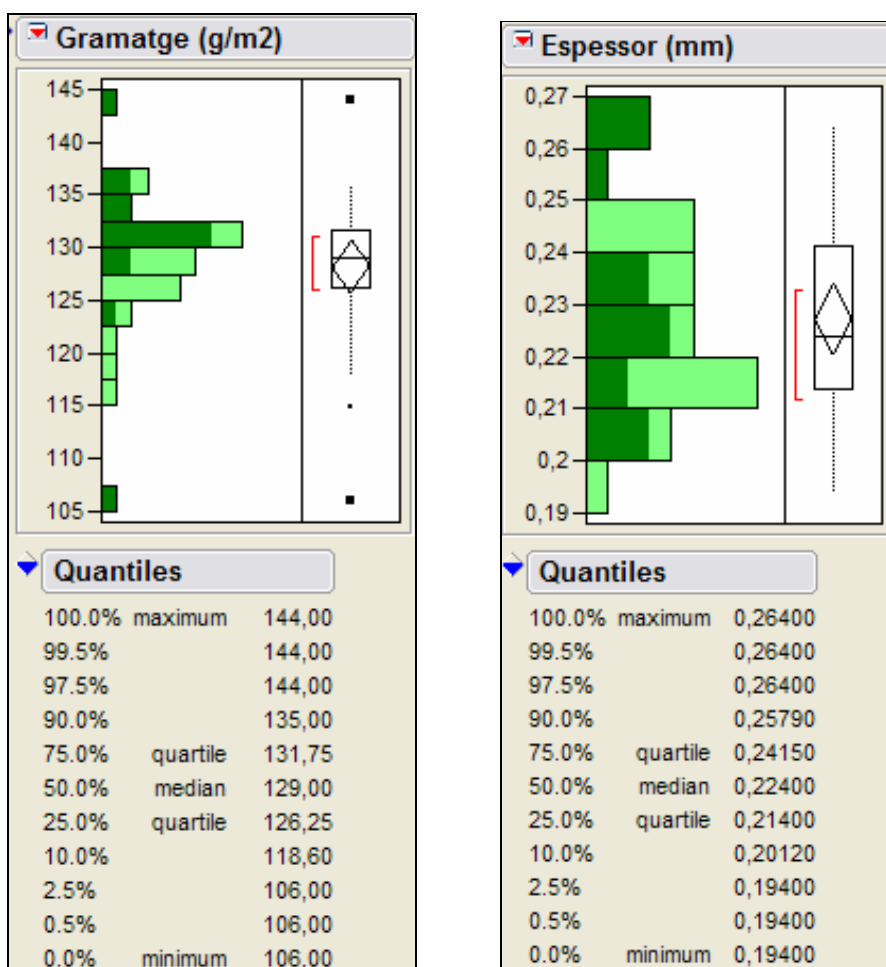
Mescla	Percentatge de pasta cel·lulósica			Grau de refinació (°SR)	Gramatge (g/m <sup>2</sup> )	Espessor (mm)	Densitat ap. (g/cm <sup>3</sup> )	Volum esp. ap. (cm <sup>3</sup> /g)	Í. tracció (kNm/kg)	Allargament (%)	Zero-span (kN/m)
	P. diari	Pi	Sisal								
1	0	0	1	36	130	0,204	0,64	1,57	71,4	5,6	13,83
2	0	0	1	36,5	129	0,209	0,62	1,62	66,4	7,3	13,96
3	0	1	0	26,25	129	0,222	0,58	1,72	62,2	6,0	13,44
4	0	1	0	27	133	0,214	0,62	1,61	63,9	5,5	13,16
5	1	0	0	62,5	144	0,253	0,57	1,75	28,6	2,6	9,42
6	1	0	0	62,5	135	0,233	0,58	1,72	26,7	2,8	8,97
7	50	0	50	56	135	0,232	0,58	1,73	43,8	4,5	12,41
8	50	50	0	52,75	129	0,200	0,65	1,54	41,7	3,6	10,08
9	0	50	50	31,5	131	0,223	0,59	1,70	63,6	6,3	13,87
10	66,67	16,67	16,67	57,75	129	0,263	0,49	2,03	36,9	3,8	10,46
11	16,67	66,67	16,67	38	132	0,230	0,58	1,74	62,1	4,6	12,64
12	16,67	16,67	66,67	42,25	134	0,264	0,51	1,97	62,4	4,4	13,49
13	33,33	33,33	33,33	46,75	106	0,231	0,46	2,18	56,5	5,1	11,71
14	80	10	10	60	130	0,260	0,50	1,99	37,5	3,2	9,8
15	10	80	10	33,5	124	0,218	0,57	1,76	65,6	4,3	13,07
16	10	10	80	36,25	130	0,222	0,59	1,71	60,6	5,2	14,84

Taula 14. Resultats dels assaigs físics del segon conjunt de mescles (continuació)

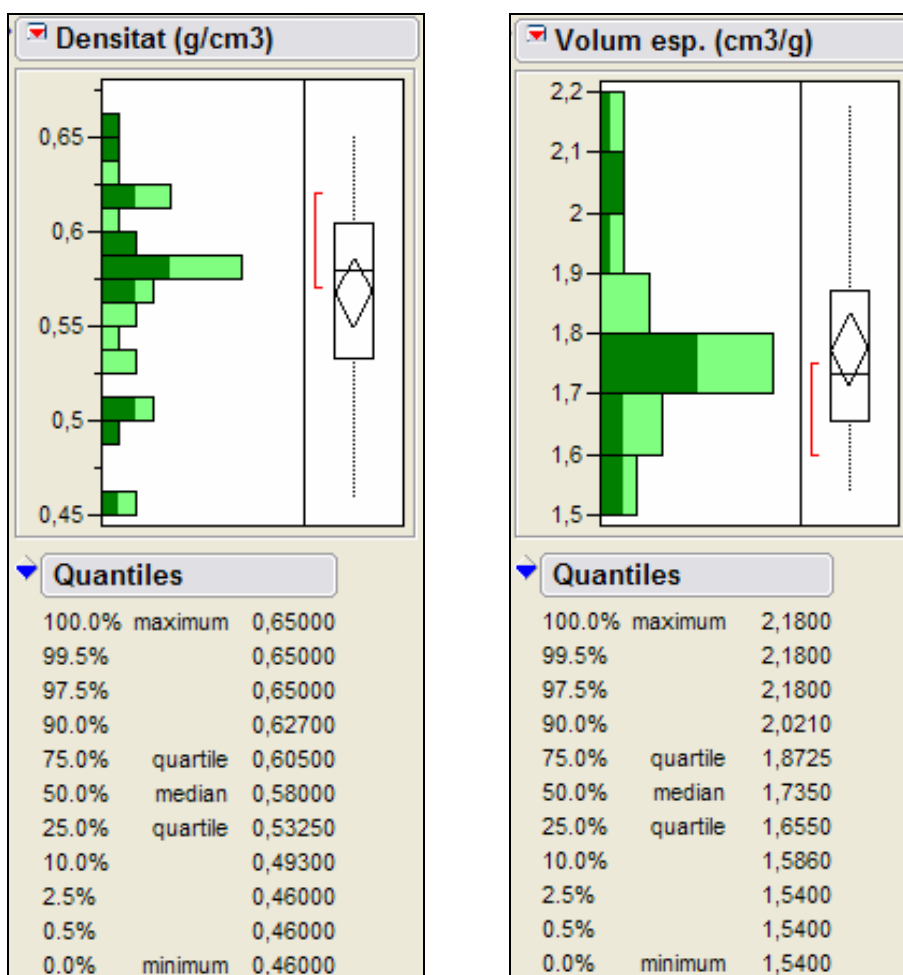
Mescla	Percentatge de pasta cel·lulósica			Í. rasgada (mN.m <sup>2</sup> /g)	Í. rebotament (kPa.m <sup>2</sup> /g)	RCT (kN/m)	Treball (J)	Energia en la tracció (J/m <sup>2</sup> )	Í. energia en la tracció (J/kg)	CMT (N)	Permeabilitat a l'aire (ml / m <sup>2</sup> .Pa.s)
	P. diari	Pi	Sisal								
1	0	0	1	319	7,78	1,28	0,506	337	2,59	234	0,6
2	0	0	1	329	7,95	1,23	0,6	400	3,09	247	0,76
3	0	1	0	196	7,10	1,02	0,467	311	2,42	191	0,33
4	0	1	0	188	7,19	1,18	0,456	304	2,29	215	0,14
5	1	0	0	79,9	2,09	0,83	0,103	68,9	0,48	118	0,28
6	1	0	0	82,8	1,99	0,67	0,099	66,1	0,49	98,6	0,33
7	50	0	50	209	3,95	0,86	0,263	175	1,31	154	0,37
8	50	50	0	118	3,69	0,79	0,188	126	0,97	144	0,2
9	0	50	50	268	7,26	1,12	0,512	342	2,61	199	0,28
10	66,67	16,67	16,67	132	3,07	0,96	0,181	121	0,93	158	0,55
11	16,67	66,67	16,67	194	5,56	0,84	0,365	243	1,85	207	0,31
12	16,67	16,67	66,67	279	5,32	1,1	0,366	244	1,82	244	0,97
13	33,33	33,33	33,33	247	5,34	0,9	0,342	228	2,15	179	0,43
14	80	10	10	123	2,68	0,85	0,157	105	0,81	156	0,47
15	10	80	10	200	6,06	1,05	0,357	238	1,92	217	0,26
16	10	10	80	300	6,69	1,13	0,419	279	2,15	246	0,56

Els valors de gramatge, espessor, densitat aparent i volum aparent no depenen del tipus de pasta cel·lulósica utilitzada per a la formació del full, a diferència de tots els altres resultats. Aquestes quatre variables depenen només de com s'ha format el full. El fet de tractar-se, en aquest cas, d'una formació manual fa que no s'aconsegueixin valors de gramatge, espessor, densitat aparent i volum específic constants en tots els fulls.

Les Figures 31, 32, 33 i 34 mostren les distribucions dels conjunts de resultats de cada una d'aquestes quatre determinacions. El tractament estadístic de les dades i l'obtenció dels gràfics següents es van fer amb el software *JMP*.



Figures 31 i 32. Distribucions dels resultats dels assaigs de gramatge i espessor, respectivament.



Figures 33 i 34. Distribucions dels resultats dels assaigs de gramatge i espessor, respectivament.

D'aquestes quatre propietats analitzades, l'única que presenta una distribució normal és el gramatge. Aquest fet és lògic ja que el gramatge és l'única variable que es controla en el procés de formació manual dels fulls. En aquest tipus de formació és impossible controlar l'espessor, la densitat aparent i el volum específic.

La resta d'assaigs físics sí que depenen del tipus de pasta cel·lulósica i del percentatge d'aquestes en la barreja utilitzada per a la formació dels fulls.

Si s'observen els valors del grau de refinació, es pot veure que totes les mescles el tenen semblant, tret de les que contenen paper de diari, que el tenen més elevat que les altres. Aquest fet és degut a l'alt grau de refinació de la pasta obtinguda a partir del paper de diari (59,5 °SR).

Els valors de l'índex de tracció són tots del mateix ordre, però en els fulls formats a partir de barreges amb alts continguts de retalls o paper de diari, els valors són bastant menors.

Pel que fa a l'allargament, les mostres que presenten un valor major són les que contenen sisal, seguides de les que contenen pi i, per últim, les barreges amb alts continguts de retalls o paper de diari presenten allargaments molt menors.

Amb els assaigs de *Zero-span* i d'índex de rasgada, es repeteix la mateixa tendència que en el cas anterior.

En el cas de l'índex de rebentament, els fulls formats amb més percentatge de pi o sisal presenten índexs molt majors que els fulls formats amb els altres dos tipus de pastes cel·lulósiques.

Els resultats de l'assaig de RCT són molt similars entre ells. Tot i que els fulls formats amb retalls o paper de diari han donat valors més baixos que els fulls formats amb sisal o pi.

Pel que fa al treball obtingut a partir de l'assaig de tracció, els fulls que presenten un valor més elevat són els que han estat formats a partir de percentatges alts de sisal, seguits pels que han estat formats a partir alts continguts de pi, pels que s'han format a partir de retalls i, per últim, els que s'han format a partir de paper de diari.

En els resultats de l'energia en la tracció, de l'índex d'energia en la tracció i de l'assaig de CMT, succeeix exactament el mateix que en el cas anterior.

Per últim, en l'assaig de permeabilitat a l'aire els resultats més alts s'han donat en les mostres de fulls formats amb continguts alts de sisal, seguits dels que han estat format amb percentatges elevats de retalls i, finalment, els fulls formats amb pi o paper de diari.

En la majoria dels casos, els fulls que presenten majors valors són els formats a partir de sisal i, en segon lloc, els formats a partir de pi. Els fulls formats a partir de retalls o paper de diari tenen valors menors. Cal tenir en compte que aquestes pastes provenen de materials recuperats i això fa que les fibres estiguin deteriorades o tallades, la qual cosa no permet que s'entrellacin entre elles tan bé com les fibres verges (pastes de pi i de sisal). El fet de no entrellaçar-se, fa que no siguin tan resistents a forces mecàniques i, per això, els resultats siguin valors menors. A més, ni els retalls ni el paper de diari contenen fibres de sisal, sinó que contenen fibres de pi i eucaliptus, que són fibres amb resistència a forces mecàniques més baixa.



Amb l'anàlisi estadística es pretén discernir si els factors estudiats (és a dir, els percentatges de pastes) produeixen variacions significatives en les variables resposta estudiades i quins dels factors estudiats tenen una major influència en aquestes variables.

Mitjançant el software *JMP*, es construeix un model estadístic en el qual la variable dependent, que en aquest cas són els resultats dels assaigs físics, es representa en funció de totes les variables independents, que són els percentatges de pastes.

En les Figures 35 a 46, es mostren els valors dels estadístics obtinguts en la construcció d'aquest model.

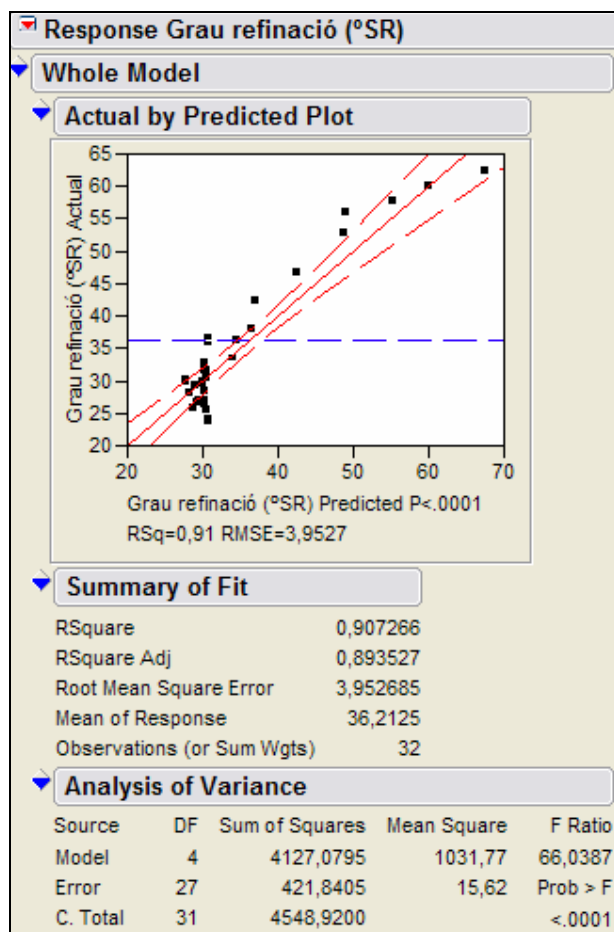


Figura 35. Representació del grau de refinació vs el grau de refinació predit pel model

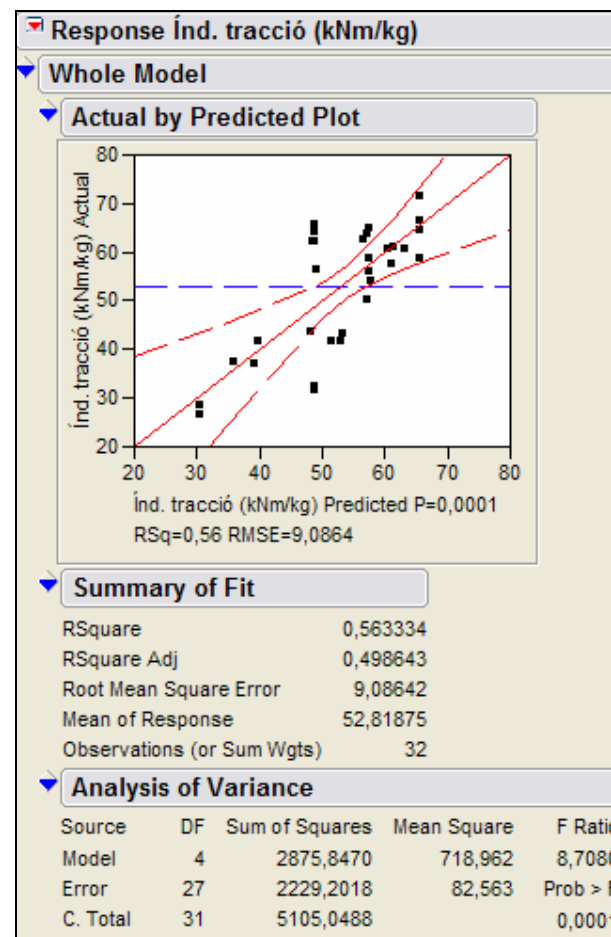


Figura 36. Representació de l'índex de tracció vs l'índex de tracció predit pel model

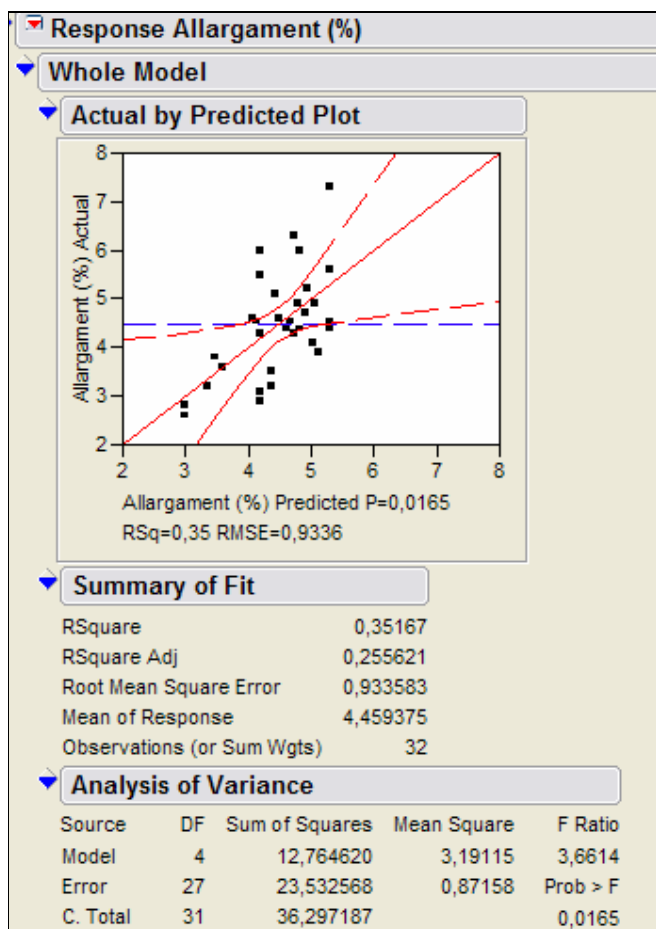


Figura 37. Representació de l'allargament vs  
l'allargament predit pel model

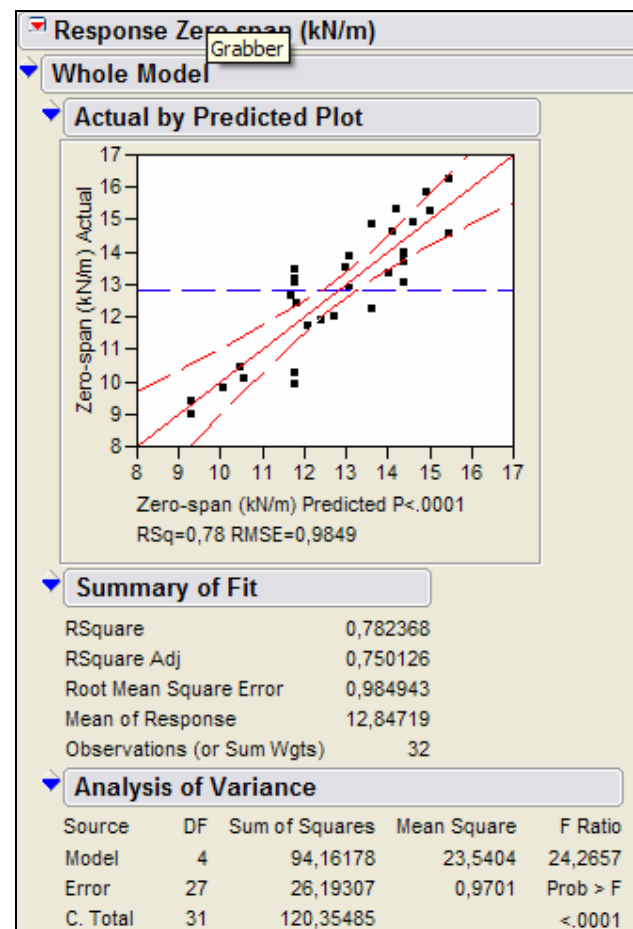


Figura 38. Representació del Zero-span vs  
el Zero-span predit pel model

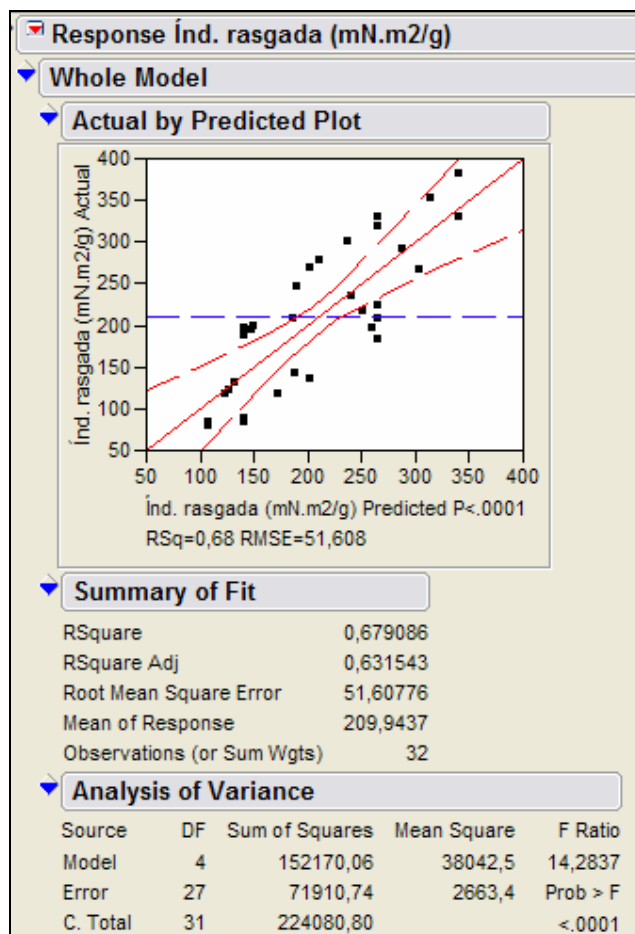


Figura 39. Representació de l'índex de rasgada vs  
l'índex de rasgada predit pel model

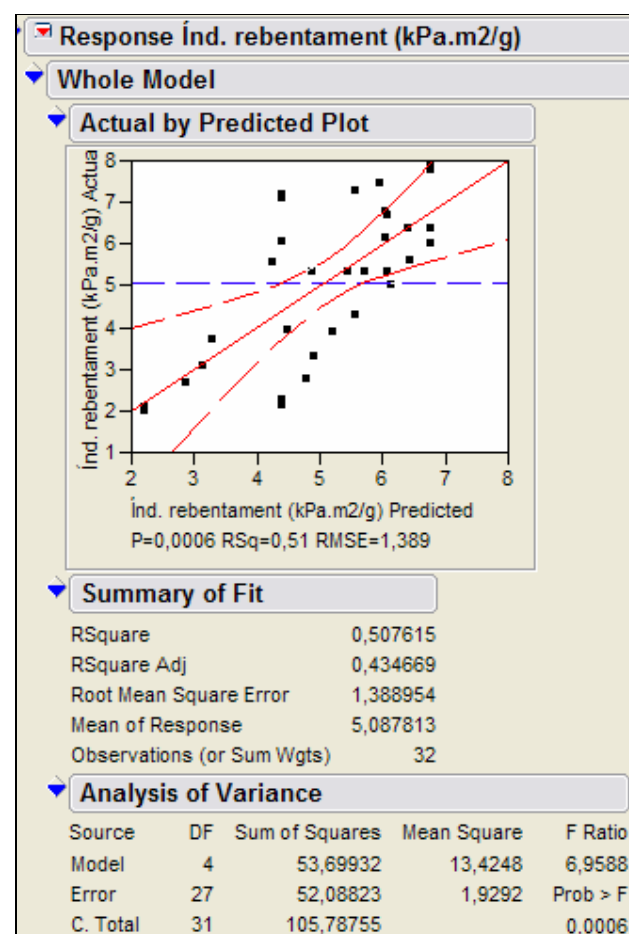


Figura 40. Representació de l'í. de rebentament vs  
l'í. de rebentament predit pel model

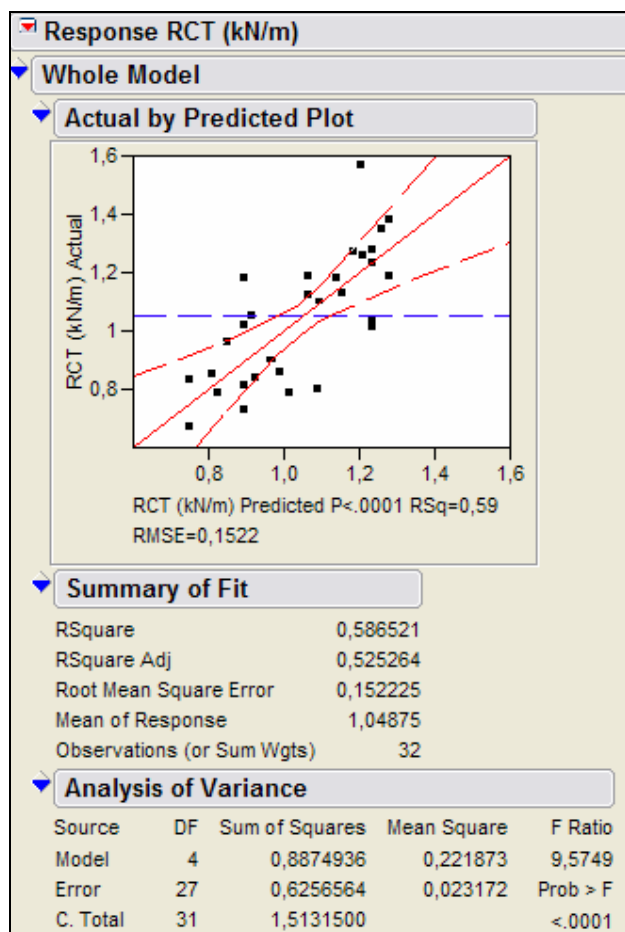


Figura 41. Representació del RCT vs  
el RCT predit pel model

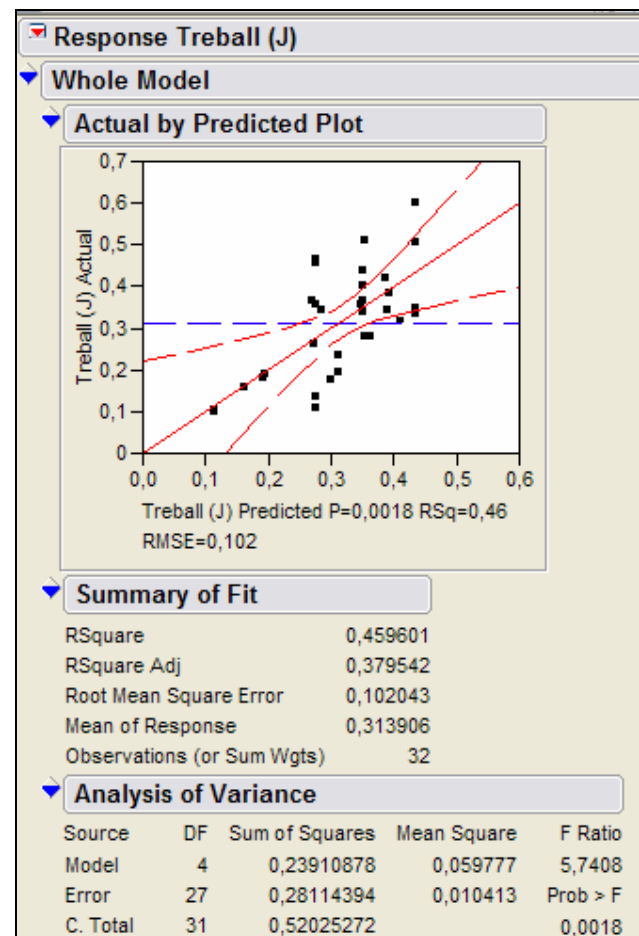


Figura 42. Representació del treball vs  
el treball predit pel model

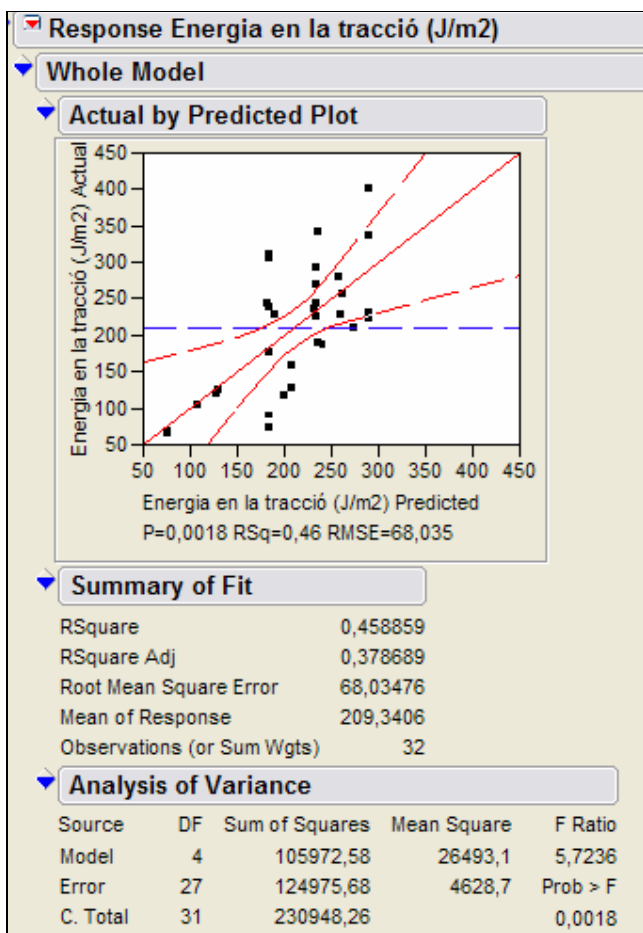


Figura 43. Representació de l'energia en la tracció vs l'energia en la tracció predit pel model

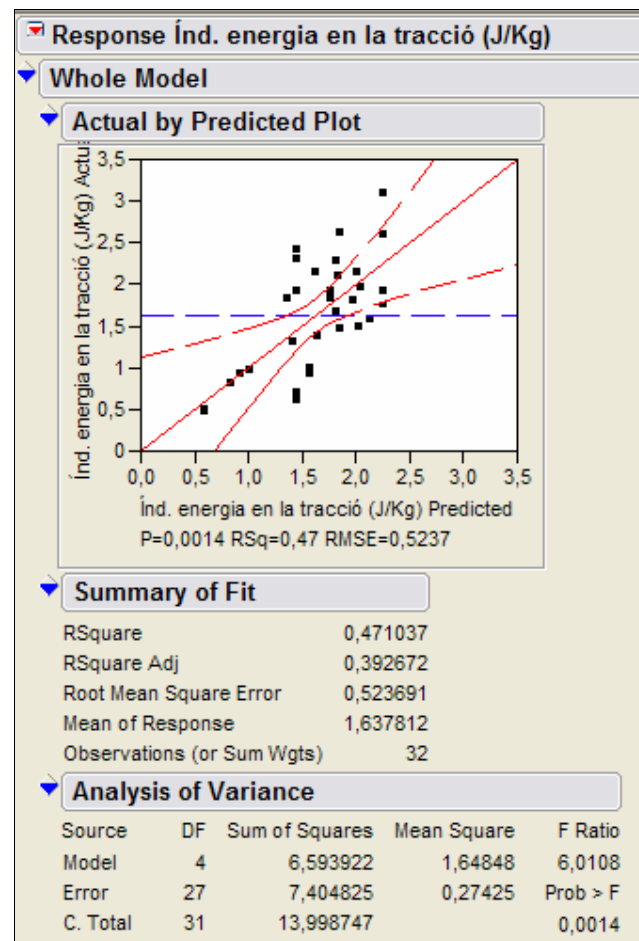


Figura 44. Representació de l'índex d'energia en la tracció vs l'índex d'energia en la tracció predit pel model

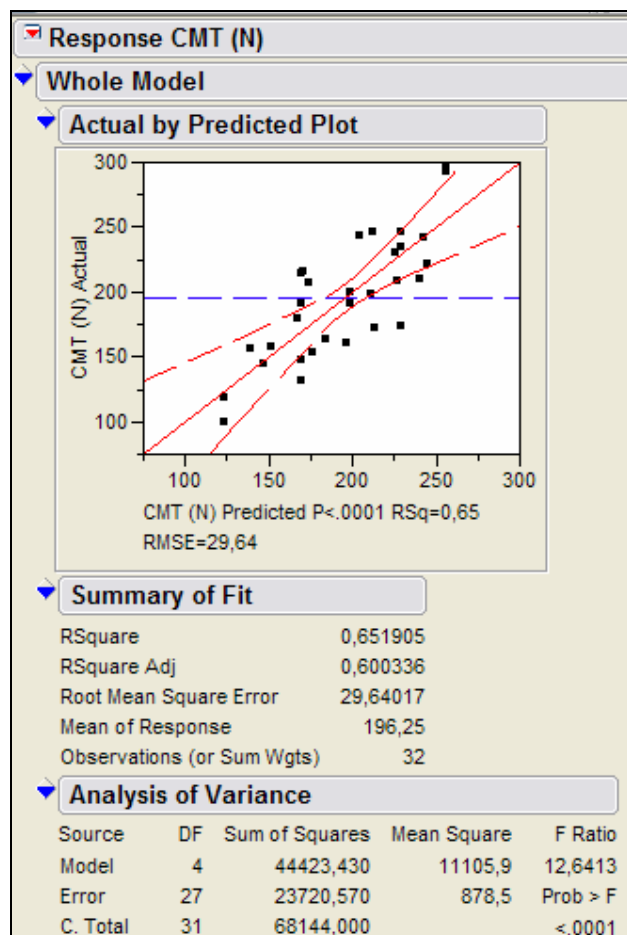


Figura 45. Representació del CMT vs el CMT predit pel model

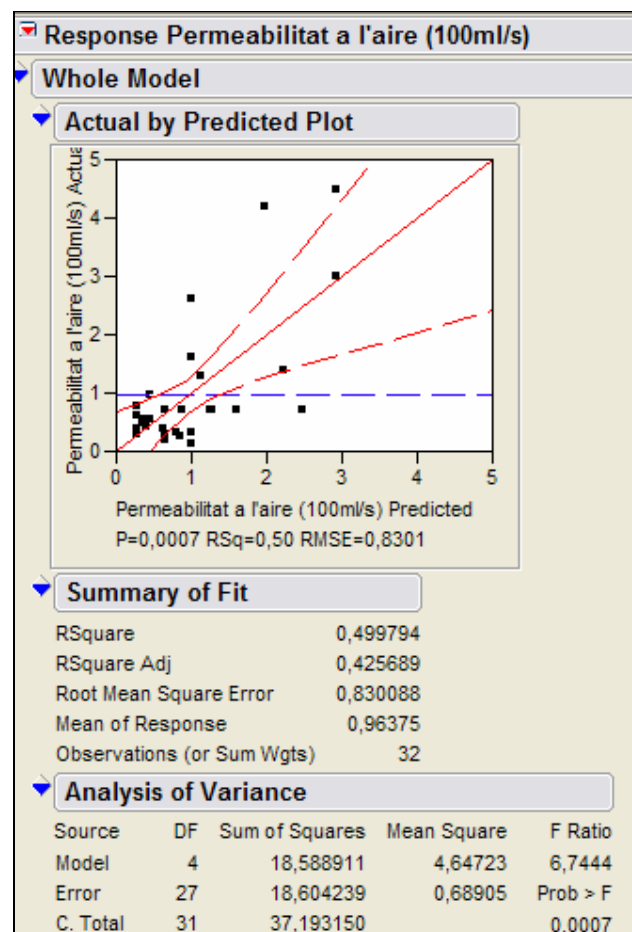


Figura 46. Representació de la permeabilitat a l'aire vs la permeabilitat a l'aire predit pel model

Es pot analitzar, per exemple, la figura 35 on s'observa el següent: s'ha obtingut un coeficient de correlació de 0,91, això significa que el percentatge de pastes expliquen la variació del grau de refinació en una 91%; a més, l'anàlisi de variància de model amb una F.Ratio de 66,04 i una Prob>F inferior a 0,0001, ens indica que no és l'error aleatori el que ens fa variar el grau de refinació, sinó el percentatge de pastes utilitzat en la formació dels fulls.

La línia horitzontal mostra la mitjana aritmètica de tots els resultats de cada variable. La línia recta de color vermell, mostra la zona on s'haurien de situar els punts si la correlació entre els valors experimentals i els valors calculats mitjançant el model fos perfecte. Els intervals de confiança d'aquesta recta mostren també, la significació del model, tal i com mostra la Figura 47.

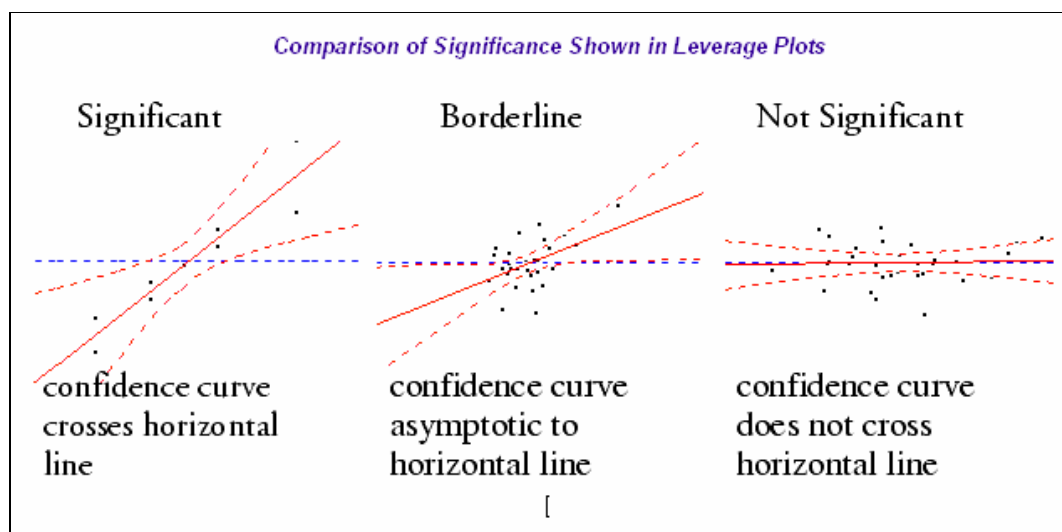


Figura 47. Interpretació dels intervals de confiança de les rectes ajustades.

(SAS Institute Inc., 2003)

Si els intervals de confiança de la recta creuen la línia horitzontal, mostra que el model és estadísticament representatiu del que succeeix a la realitat. Si els intervals de confiança són asimptòtics respecte l'horitzontal, és indicatiu de que el model està al límit de la significació. Finalment, si els intervals de confiança inclouen la línia horitzontal, indica que el model no és significatiu i que per tant, no representa les variacions de la variable dependent estudiada en funció de les variables independents.

En referència a l'exemple, la Figura 35, es pot veure que els intervals de confiança de la recta creuen la línia horitzontal indicant que el model representa correctament la variació del grau de refinació en funció del percentatge de pastes.



Es pot observar que per totes les variables físiques la Prob>F sempre és més petita que 0,05, la qual cosa indica que no és l'error aleatori el que fa variar la variable física, sinó les variables independents que s'han seleccionat.

També en tots els gràfics, la línia que representa la mitjana aritmètica creua les línies de l'interval de confiança, el que significa que el model representa correctament la variació de les variables en funció del percentatge de pastes.

En la taula 15 es relacionen, en ordre decreixent, els coeficients de correlació obtinguts en l'anàlisi estadística anterior dels resultats dels assaigs enfront del percentatge de pastes.

Taula 15. Relació dels coeficients de correlació

	<b>Coefficient de correlació (R<sup>2</sup>)</b>
<b>Grau de refinació (°SR)</b>	0,91
<b>Zero-span (kN/m)</b>	0,78
<b>Í. rasgada (mN.m<sup>2</sup>/g)</b>	0,68
<b>CMT (N)</b>	0,65
<b>RCT (kN/m)</b>	0,59
<b>Í. tracció (kNm/kg)</b>	0,56
<b>Í. rebentament (kPa.m<sup>2</sup>/g)</b>	0,51
<b>Permeabilitat a l'aire (ml / m<sup>2</sup>.Pa.s)</b>	0,5
<b>Í. energia en la tracció (J/kg)</b>	0,47
<b>Treball (J)</b>	0,46
<b>Energia en la tracció (J/m<sup>2</sup>)</b>	0,46
<b>Allargament (%)</b>	0,35

Com es pot observar en la taula anterior, la variable que està més ben explicada pel percentatge de pastes és el grau de refinació i la que menys és l'allargament.

Per caracteritzar les pastes no cal realitzar totes aquestes determinacions, sinó que es recomanaria analitzar només el grau de refinació, el *zero-span*, l'índex de rasgada, el CMT, el RCT, l'índex de tracció i la permeabilitat a l'aire.

Com es pot veure a la figura 48, l'índex de tracció, l'índex de rebentament, el treball, l'energia en la tracció i l'índex d'energia en la tracció tenen un alt grau de dependència entre elles.



Figura 48. Dependència entre les variables d'índex de tracció, índex de rebentament, treball, energia en la tracció i índex d'energia en la tracció

És lògic que l'índex de tracció, el treball, l'energia en la tracció i l'índex d'energia en la tracció mantinguin aquesta relació de dependència, ja que tots aquests valors s'obtenen del mateix assaig, l'assaig de tracció.

Pel que fa a l'índex de rebentament, s'obté en un assaig diferent de l'assaig de tracció. De totes maneres, es pot observar en la figura anterior, que el grau de correlació amb les altres variables és proper a 1; per tant, es pot dir que no cal que es faci aquesta determinació i que amb l'assaig de tracció ja és suficient.

## 5.6. Comparació amb el paper tripa industrial

Un cop vistes les propietats físiques en funció del percentatge de fibra verge (pi i sisal) i de fibra secundària (retalls i paper de diari), es comparen amb els resultats dels assaigs físics del paper tripa industrial, cedit per l'empresa brasilera *ORSA SA*. Aquest paper és un paper tripa comercialitzat per a la fabricació de caixes de cartró destinades a l'emmagatzematge i transport de mercaderies.

En la taula 16 apareixen els resultats dels assaigs físics realitzats a la mostra de paper tripa industrial.

Taula 16. Resultats dels assaigs físics del paper tripa industrial

	<b>Grau de refinació (°SR)</b>	<b>Gramatge (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Espessor (mm)</b>	<b>Densitat ap. (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volum esp. ap. (cm<sup>3</sup>/g)</b>	<b>Í. tracció (kNm/kg)</b>
<b>Tripa longitudinal</b>	15,5	116	0,244	0,48	2,09	10,4
<b>Tripa transversal</b>	*	*	*	*	*	95,7

	<b>Allargament (%)</b>	<b>Zero-span (kN/m)</b>	<b>Í. rasgada (mN.m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Í. rebotament (kPa.m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>RCT (kN/m)</b>	<b>Treball (J)</b>
<b>Tripa longitudinal</b>	1,64	11,47	79,703	1,889	0,77	0,099
<b>Tripa transversal</b>	2,38	6,83	112,684	*	1,02	0,057

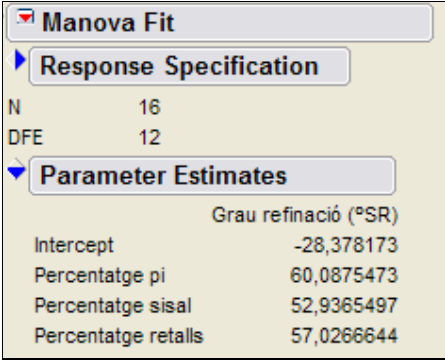
	<b>Energia en la tracció (J/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Í. energia en la tracció (J/kg)</b>	<b>CMT (N)</b>	<b>Permeabilitat a l'aire (ml / m<sup>2</sup>.Pa.s)</b>
<b>Tripa longitudinal</b>	65,73	0,565	213,84	5,84
<b>Tripa transversal</b>	37,83	0,325	106,61	*

En els casos en què la direcció de les fibres no afecta de cap manera a una determinada propietat, s'indica amb un asterisc (\*); és a dir, que en les dues direccions, els valors són idèntics.

El grau de refinació del paper tripa industrial és de 15,5 °SR, un valor molt diferent de l'obtingut en la refinació de les pastes de pi, sisal, retalls i paper de diari.

Si es fa una anàlisi de variància ANOVA del grau de refinació enfront del percentatge de pastes en el primer conjunt de mescles (Figura 49), s'obté la següent equació:

$$^{\circ}SR = -28,38 + 60,09 \cdot \% pi + 52,94 \cdot \% sisal + 57,03 \cdot \% retalls \quad (\text{Eq.8})$$



Manova Fit	
Response Specification	
N	16
DFE	12
Parameter Estimates	
	Grau refinació (°SR)
Intercept	-28,378173
Percentatge pi	60,0875473
Percentatge sisal	52,9365497
Percentatge retalls	57,0266644

Figura 49. Anàlisi de la variància ANOVA del primer conjunt de barreges

A partir de l'equació es dedueix que, amb la barreja de pi, sisal i retalls, no s'aconseguirà mai arribar al mateix grau de refinació que el paper tripa industrial (15,5 °SR). Com es pot veure al desenvolupament següent, els factors multiplicadors del percentatge de pastes són superiors al valor resultant d'aplicar el grau de refinació del paper tripa industrial:

$$\begin{aligned} 15,5 + 28,38 &= 60,09 \cdot \% pi + 52,94 \cdot \% sisal + 57,03 \cdot \% retalls \\ 43,88 &= 60,09 \cdot \% pi + 52,94 \cdot \% sisal + 57,03 \cdot \% retalls \\ 43,88 &< 60,09 \quad ; \quad 43,88 < 52,94 \quad ; \quad 43,88 < 57,03 \end{aligned}$$

Si es fa una altra anàlisi de variància ANOVA del grau de refinació enfront del percentatge de pastes en el segon conjunt de mescles (Figura 50), s'obté la següent equació:

$$^{\circ}SR = 70 - 41,19 \cdot \% pi - 32,86 \cdot \% sisal - 3,62 \cdot \% p.diari \quad (\text{Eq.9})$$

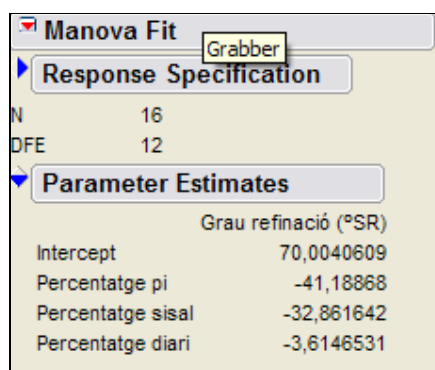


Figura 50. Anàlisi de la variància ANOVA del segon conjunt de barreges

A partir de l'equació es dedueix que, amb la barreja de pi, sisal i paper de diari, tampoc s'aconseguirà mai arribar al mateix grau de refinació que el paper tripa industrial (15,5 °SR). De la mateixa manera que en el cas anterior, els factors multiplicadors del percentatge de pastes són superiors al valor resultant d'aplicar el grau de refinació del paper tripa industrial:

$$\begin{aligned}
 15,5 - 70,0 &= -41,19 \cdot \% \text{ pi} - 32,86 \cdot \% \text{ sisal} - 3,62 \% \text{ p.diari} \\
 -54,5 &= -41,19 \cdot \% \text{ pi} - 32,86 \cdot \% \text{ sisal} - 3,62 \cdot \% \text{ p.diari} \\
 -54,5 &< -41,19 \quad ; \quad -54,5 < -32,86 \quad ; \quad -54,5 < -3,62
 \end{aligned}$$

Pels motius anteriors, per poder comparar les propietats mecàniques dels fulls formats amb el paper tripa industrial, s'hauria de refinar menys temps i aconseguir un grau de refinació similar.

En la figura 51 es veu representat el valor mínim de grau de refinació que s'hauria d'assolir amb les diferents pastes cel·lulósiques. D'aquesta manera es pot tenir una idea del temps necessari per refinar cada tipus de pasta, si es volgués aconseguir aquest grau de refinació.

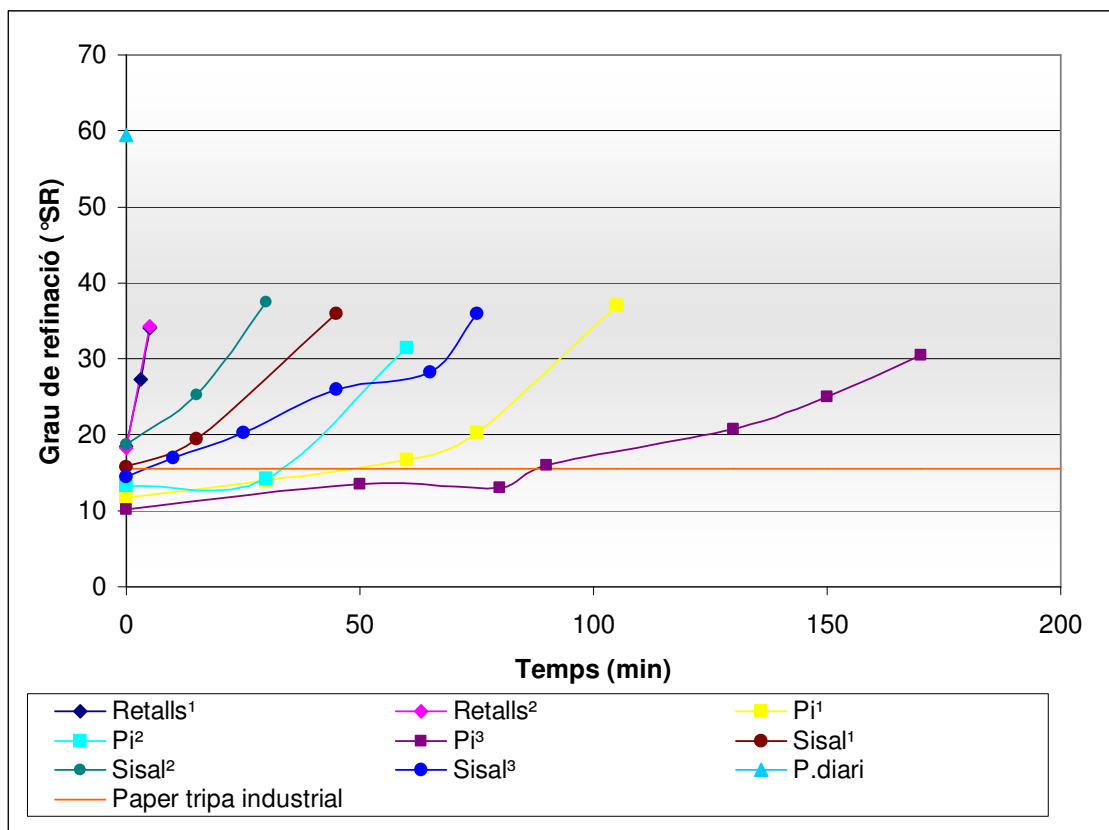


Figura 51. Evolució del grau de refinació de les pastes i valor mínim que es pot assolir

De totes maneres, per poder tenir una idea qualitativa sobre quina de les trenta-dues barreges s'acosta més al valor objectiu del paper tripa industrial, es comparen totes les dades que es tenen de les diferents variables físiques dels fulls formats i del paper tripa industrial.

En les figures de la 52 a la 62, es veu aquesta comparació representada gràficament.

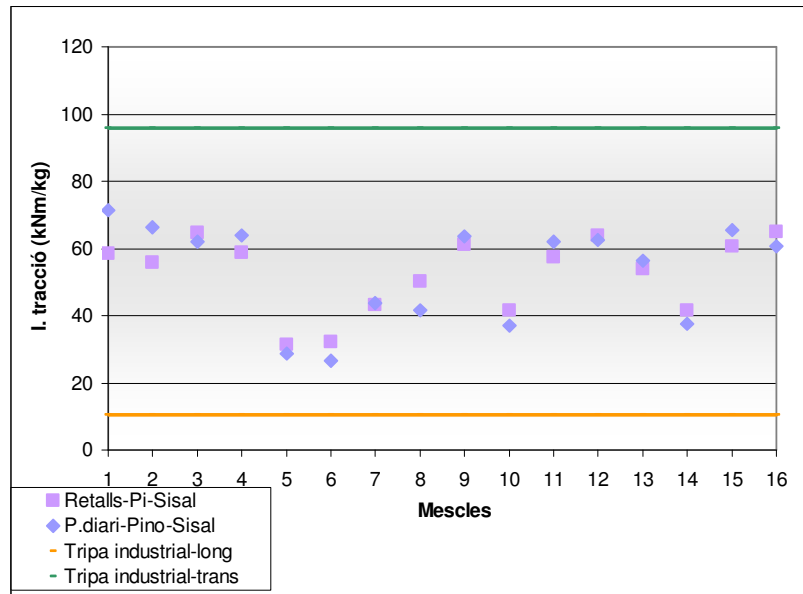


Figura 52. Comparació dels resultats de l'índex de tracció

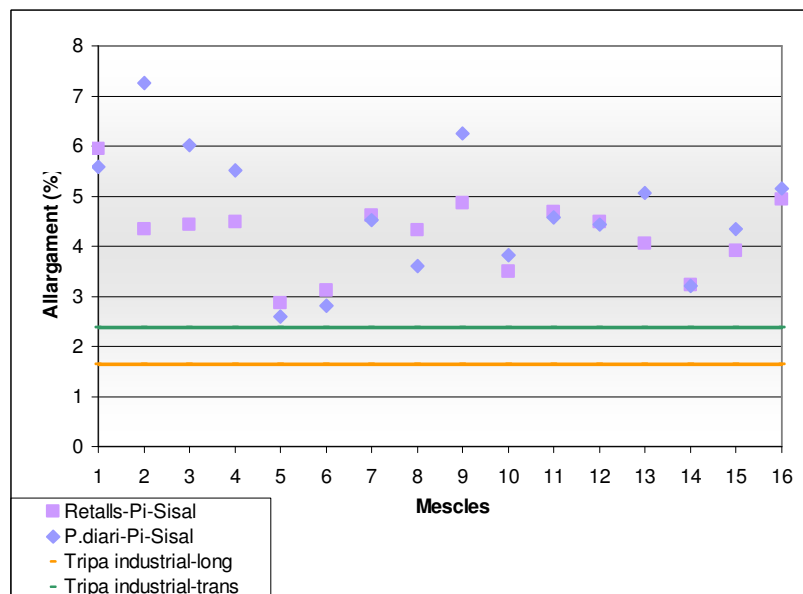


Figura 53. Comparació dels resultats de l'allargament

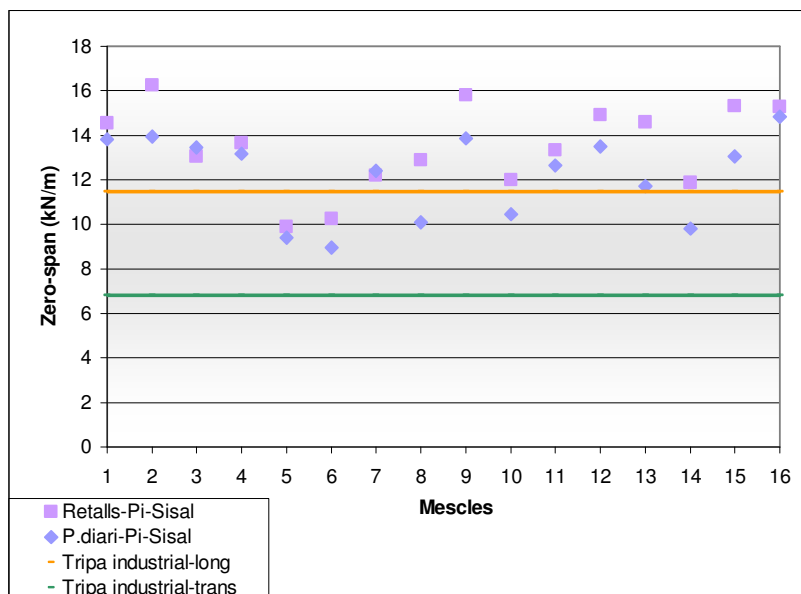


Figura 54. Comparació dels resultats del zero-span

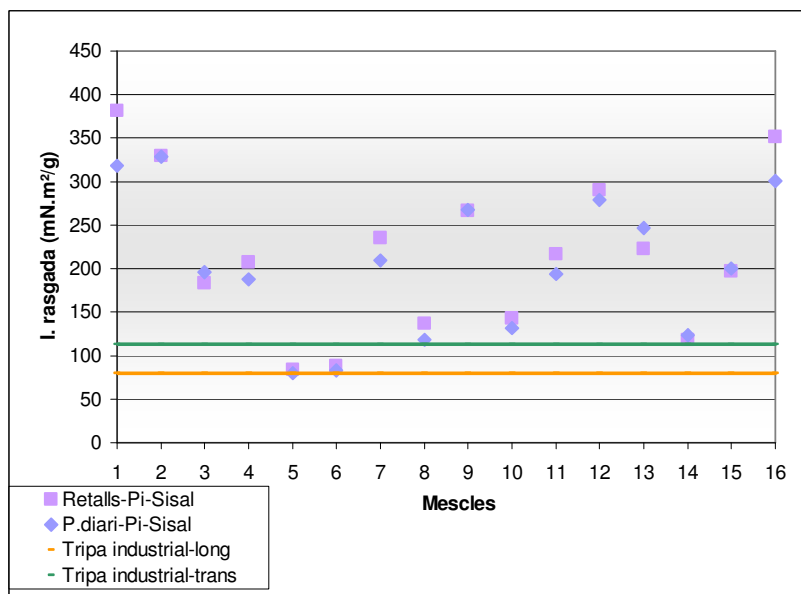


Figura 55. Comparació dels resultats de l'índex de rasgada



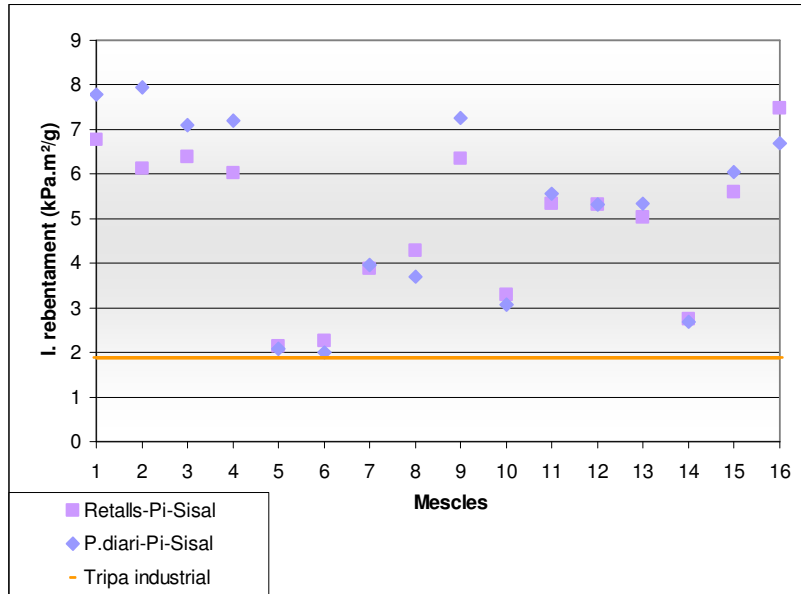


Figura 56. Comparació dels resultats de l'índex de rebentament

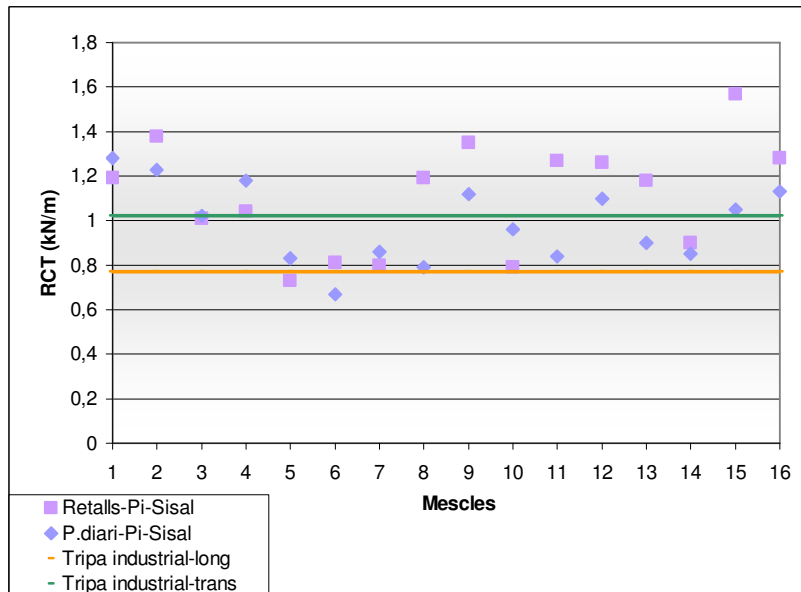


Figura 57. Comparació dels resultats del RCT

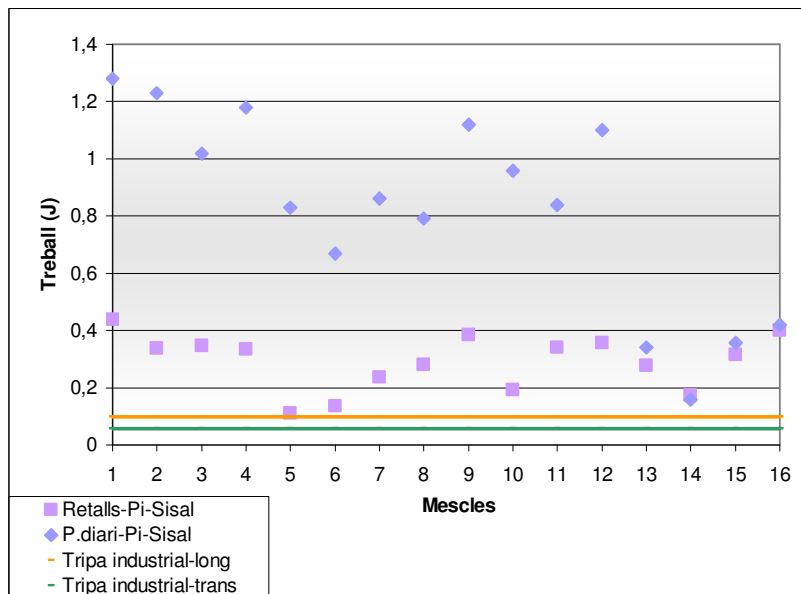


Figura 58. Comparació dels resultats del treball

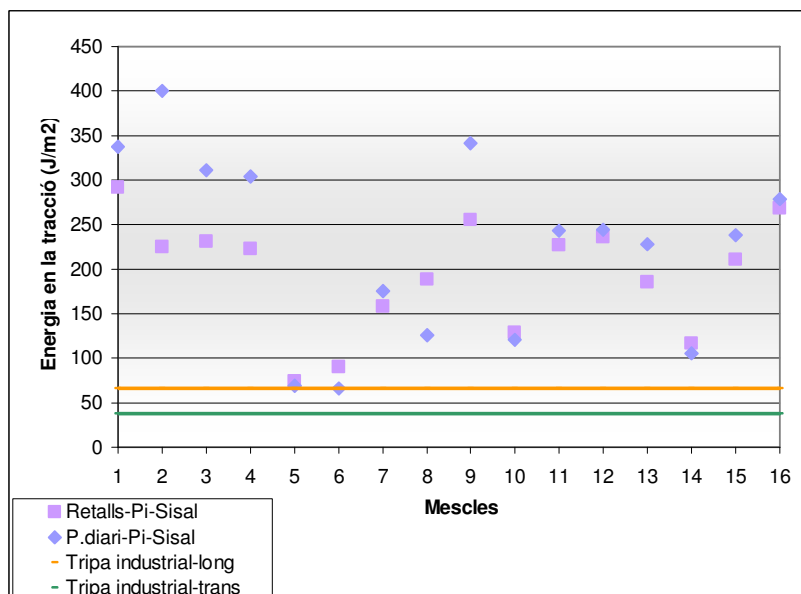


Figura 59. Comparació dels resultats de l'energia en la tracció

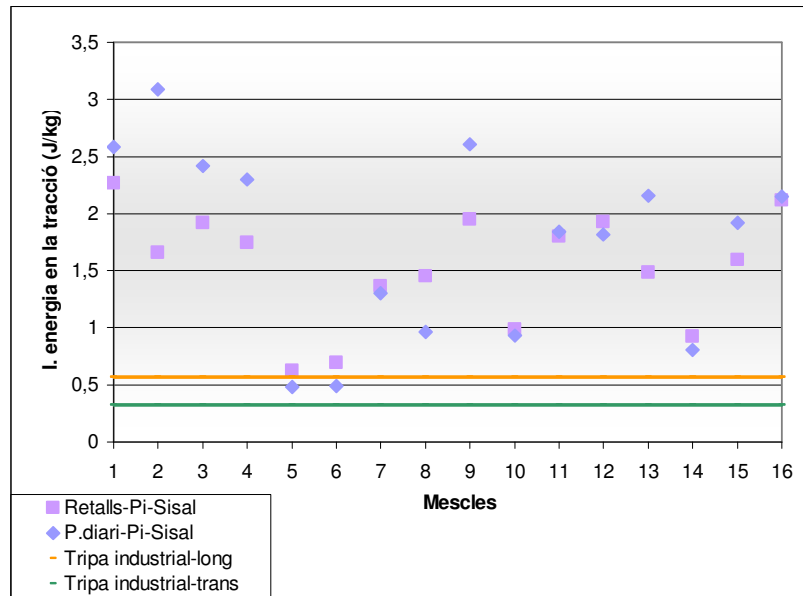


Figura 60. Comparació dels resultats de l'índex d'energia en la tracció

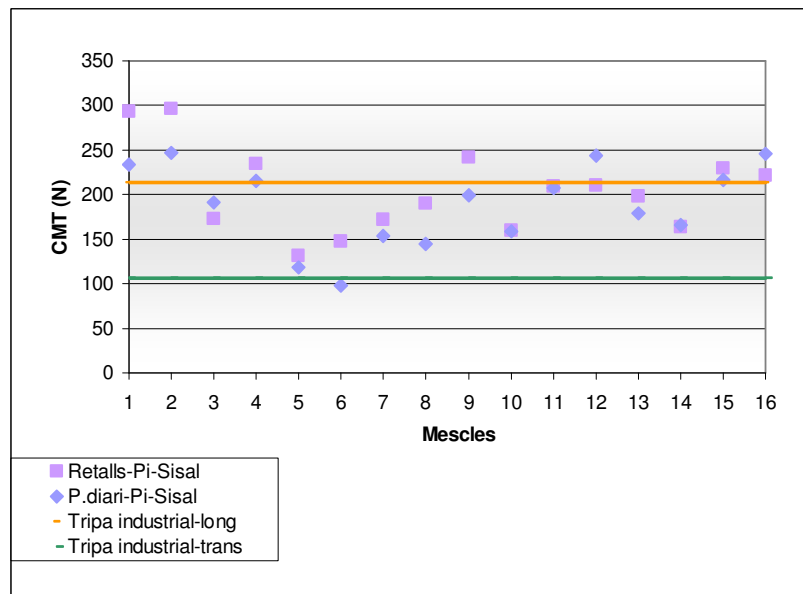


Figura 61. Comparació dels resultats del CMT

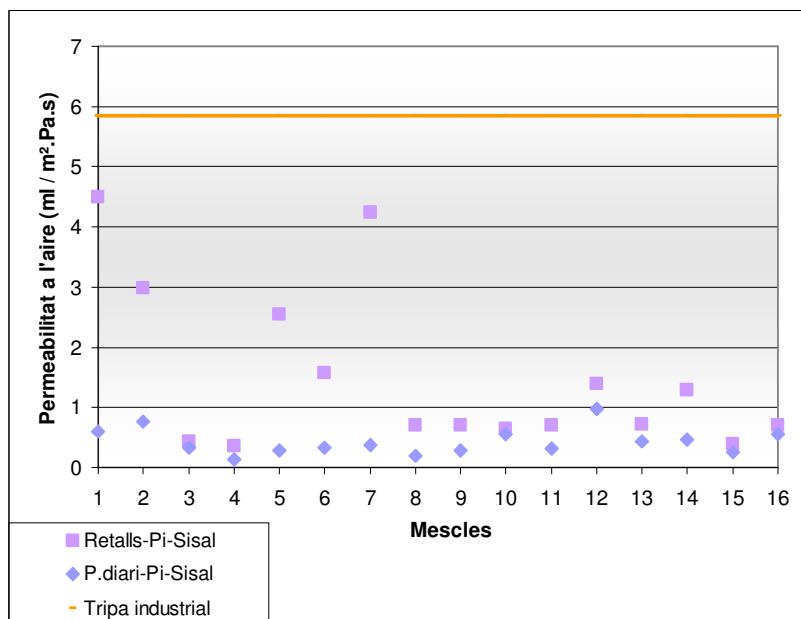


Figura 62. Comparació dels resultats de la permeabilitat de l'aire

Per gairebé totes les propietats físiques avaluades, les mostres que més s'acosten als valors del paper tripa industrial són les formades amb un 100% de retalls o amb un 100% de paper de diari (mostres 5 i 6).

Per tant, per a la fabricació de paper tripa industrial no s'ha de pensar en incorporar noves fibres verges, sinó en fibres secundàries procedents de retalls o de paper recuperat. Tot i que aquestes matèries primeres són les predominants, per no perdre al llarg dels cicles de reciclatge propietats físiques, cal incorporar fibres verges, però en percentatges cada cop més reduïts, per ajudar a la sostenibilitat dels boscos brasilers, que com s'ha dit a la introducció, estan en situació crítica.

## 6. RESUM DEL PRESSUPOST

A continuació, es detallen les despeses de realització d'aquest estudi. Es tenen en compte dos tipus de despeses: el cost del material i el cost de realització i redacció de l'estudi.

Descripció	Cost unitari	Unitats	Import
- Pasta cel·lulósica de pi	1,3 €	3 kg	3,9 €
- Pasta cel·lulósica de sisal	1,9 €	3 kg	5,7 €
- Material de laboratori	--	--	500 €
- Recerca informació bibliogràfica	8 €	40 h	320 €
- Anàlisi de laboratori	8 €	320 h	2560 €
- Estudi dels resultats i redacció del projecte	8 €	190 h	1520 €
		Import net	4909,6 €
		IVA (16%)	785,54 €
		<b>TOTAL</b>	<b>5695,14 €</b>

## **7. CONCLUSIONS**

Després d'estudiar els resultats de les diferents variables morfològiques, químiques i físiques, determinades en fulls formats en laboratori a partir de barreges de pastes cel·lulòsiques de pi, sisal, retalls i paper de diari, s'arriba a les següents conclusions:

1. El grau de refinació és la variable que està més ben explicada pel percentatge de pastes, és a dir que, de totes les variables estudiades, aquesta és la que més varia segons la composició de la barreja amb la qual s'han format els fulls.

Aquesta relació de dependència evidencia que, per deduir la resposta de totes les altres variables i sobretot les físiques, el grau de refinació és un indicatiu vàlid.

Si es té en compte que el procés de refinació es basa en tractar les fibres de manera mecànica, per tal que aquestes s'obrin i es puguin entrellaçar entre elles per obtenir paper amb resistències a forces mecàniques més altes, és totalment raonable que el grau de refinació de les pastes condiciona la resposta de les variables físiques.

2. No és necessari analitzar totes les variables físiques que s'han estudiat.

Pel que fa al treball, a l'energia en la tracció i a l'índex d'energia en la tracció són valors resultants de l'assaig de tracció i són directament proporcionals a l'índex de tracció, dada més important d'aquest assaig. Per aquest motiu, no és imprescindible analitzar totes aquestes variables, sinó que amb l'índex de tracció ja és suficient.

A més, l'índex de rebentament també depèn d'una manera directa de les variables esmentades abans, per tant, tampoc és rellevant realitzar aquesta determinació, ja que se'n pot tenir una idea qualitativa a partir de l'índex de tracció.

3. Els fulls formats al laboratori amb propietats que més s'apropen a les del paper tripa industrial, són els que provenen de pastes recuperades de retalls i paper de diari.

Per tant, per a la fabricació de paper tripa industrial destinat a cartró multicapa, no és necessari incorporar fibres verges en grans proporcions, sinó que les propietats que proporcionen les fibres secundàries procedents de paper recuperats (en aquest cas, retalls i paper de diari) s'ajusten perfectament a les requerides per aquest tipus de paper, el paper tripa. Cal dir que, tot i que aquestes matèries primeres són les que han de predominar en la formació del paper, també s'han d'incorporar fibres verges en percentatges reduïts, per tal de compensar les fibres secundàries que, després de molts de cicles de reciclatge, perden les propietats físiques.

Els productors brasilers usen retalls per a la fabricació de paper tripa, però el paper de diari no és utilitzat com a matèria primera i es converteix en residu després de ser llegit. Aquest material és excel·lent per produir paper tripa per a la fabricació de caixes de cartró destinades a l'emmagatzematge i al transport.

D'aquesta manera, amb l'increment de matèries primeres provinents de papers recuperats i amb la reducció de matèries primeres verges en la composició del paper tripa, es contribueix a millorar la problemàtica actual dels residus derivats de l'activitat humana i, principalment, a preservar els boscos brasilers, tan amenaçats a l'actualitat.

## **8. RELACIÓ DE DOCUMENTS**

Els documents que formen el present projecte són:

- Memòria
- Annexos a la memòria

Isabel Jaume Sureda  
Girona, 19 de juny de 2006



## **9. BIBLIOGRAFIA**

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR NM ISO 187:2000 - Papel, cartão e pasta celulósica - Atmosfera normalizada para condicionamento e ensaio e procedimento de controle da atmosfera e condicionamento das amostras - Errata n°1/2000.
- ABNT. NBR 302: 2005 - Pastas celulósicas – Determinação do número Kappa.
- ABNT. NBR NM ISO 534-2000 - Papel e cartão - Determinação da espessura e da densidade aparente de uma única folha ou de um maço - Errata / 2003.
- ABNT. NBR NM ISO 536-2000 - Papel e cartão - Determinação da gramatura.
- ABNT. NBR NM 105:1999- Papel e cartão - Determinação da umidade -Método por secagem em estufa. Errata n°1/2002.
- ABNT. NBR NM ISO 1924-2:2001 – Papel e cartão – Determinação das propriedades de tração – Método da velocidade de constante alongamento.
- ABNT. NBR NM ISO 1974:2001 - Papel – Determinação da resistência ao rasgo – Método Elmendorf.
- ABNT. NBR NM ISO 2144:2001 – Papel, cartão e pastas celulósicas – Determinação do resíduo (cinza) da incineração a 900 °C.
- ABNT. NBR NM ISO 2758:2001 – Papel – Determinação da resistência ao arrebentamento.
- ABNT. NBR NM ISO 5636/5:2001 – Papel e Cartão – Determinação da Permeância ao ar Gurley.
- ABNT. NBR 9159:2005 – Papel para miolo – Determinação da resistência à esmagamento quando ondulado em laboratório (CMT).
- ABNT. NBR 13998:1997 - Pasta celulósica - Determinação do teor de massa seca - Método por secagem em estufa.
- ABNT. NBR 13999:2003 – Papel, cartão, pasta celulósica e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após incineração a 525°C.
- ABNT. NBR 14003:1997 - Pasta celulósica - Determinação da consistência - Incorpora errata n° 1/2003.
- ABNT. NBR 14031:2004 - Pasta celulósica - Determinação da resistência à drenagem pelo aparelho Schopper-Riegler.
- ABNT. NBR 14129:1998 – Papel, cartão e pasta celulósica - Análise da composição fibrosa – Método geral.
- ABNT. NBR 14030:1998. Pasta celulósica-Desagregação a úmido em laboratório.
- ABNT. NBR 14132:1998. Papel, cartão e pasta celulósica-Análise da composição fibrosa- Método do ensaio com o corante Graff 'C'.

- ABNT. NBR 14260:2005 - Papel e cartão - Determinação da resistência ao esmagamento de anel.
- ABNT. NBR 14347 : 99 - Pasta celulósica – Refinação em Laboratório – Método Valley.
- ABNT. NBR 14479:2002. Formação de folhas manuais em formador TAPPI.
- ABNT. NBR 14527:2000 – Pasta celulósica – Determinação das propriedades físicas em folhas formadas em laboratório.
- ABTCP. Requisitos do papelão ondulado. 34 Congresso Anual de celulose e papel. Sao Paulo (Brasil), 2001.
- ABTCP. Tratamento de aparas para fabricação de papel. Sinpacel. Curitiba (Brasil), 2001.
- BARROS NETO, B. DE; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Editora UNICAMP. Campinas (Brasil), 1995.
- BIÁGIO, H. A reciclagem e a produção de papéis para embalagens. Klabin, SA. Brasil, 2003.
- BRUNO, P.G.M. Celulose de sisal: características e aplicações. 14 Congresso Anual da ABCP, volum 1, p. 31-36. Sao Paulo (Brasil), 1981.
- BUCSMAN, S.J.; CLONINGER, C.K.; NOGUEIRA, A.R.. Fibra reciclada-um recurso importante. Convenção Anual da ABCP. Brasil, 1974.
- D'ALMEIDA, M.L.O., VILHENA, A. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. IPT/CEMPRE. Sao paulo (Brasil), 2000.
- D'ALMEIDA, M.L.O.; TAKAHASHI, R.C.T.; KOGA, M.E.T. Propiedades do papel e controle de qualidade. IPT. Sao paulo (Brasil), 2004.
- EARL LIBBY, C. Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. Tomo I: Pulpa. CECSA. Mèxic, 1969.
- EMBRAPA ALGODÃO, SA. Sisal. Brasil, 2001.
- Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola. Sistema de Produção de Sisal. Comunicado Técnico nº 12. Bahia (Brasil), novembro 1995.
- FONTES ATHAYDE, M., PEREIRA, J. Normalização-Estágio atual e perspectivas na indústria de papelão ondulado. ABPO. Sao Paulo (Brasil), 2000.
- GUIMARÃES OASHI, M. DA C..Estudio da cadeia produtiva como subsídio para pesquisa e desenvolvimento do agronegocio del sisal en Paraíba. Florianópolis (Brasil), 1999.
- HILTON, A. Reciclagem-conceito e prática. O papel, p. 63-65. Brasil, dezembro 2004.
- IPT, SENAE, ABTCP. Unidades recomendadas para resultados de ensaios em papel e cartão. Sao Paulo (Brasil), 1997.
- IPT. Celulose e papel, Volume I: Tecnologia de fabricação de pasta celulósica. Escola SENAI 'Theobaldo de Nigris'. Sao Paulo (Brasil), 1998.
- IPT. Celulose e papel, Volume II: Tecnologia de fabricação do papel. Escola SENAI 'Theobaldo de Nigris'. Sao Paulo (Brasil), 1998.

- KRONKA, FRANCISCO J. N.; BERTOLANI, FRANCISCO; PONCE, REINALDO H.. A cultura do Pinus no Brasil. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Sao Paulo (Brasil), 2005.
- LUIGI, P. Introdução à fabricação de papel. ABTCP. Sao Paulo (Brasil), 2000.
- MOHSEEN, H. A reciclagem e o futuro do papel. O papel, p. 66-67. Brasil, dezembro 2004.
- POSLUSZNY, J.A., GAVAZO, G.B. Efecto de la mezcla de papeles reciclados sobre las pulpas. 31 Congreso Anual de Celulosa e Papel, p. 319-326. Sao Paulo (Brasil), 1998.
- POCOVI, H.C. Melhor qualidade do papel miolo para fabricação do papelao ondulado, pela aplicação de novas tecnologias. 20 Congresso anual da ABCP, p.317-326. Sao Paulo (Brasil), 1987.
- RATNIEKS, E. Refinação da pasta celulósica. RIOCELL, SA. ABTCP. Sao Paulo (Brasil), 2000.
- ROCHA JORDAN, J. Características físicas do papel e sua relação com os ensaios de papelão ondulado. Klabin, SA. Santa Catarina (Brasil), 2001.
- RODRIGUES, J. Papéis reciclados. Ovver Mecanica Cover, SA. Sao Paulo (Brasil), 2001.
- SILVA, N., REBOUÇAS, M., LUBI, T., MATUS. D. Pasta química de sisal. 16 Congresso Anual da ABCP, Volum 1, p. 161-167. Sao Paulo (Brasil), 1981.
- SMOOK, G.A. Manual para técnica de pulpa y papel. Tappi Press. Espanya, 1990.
- YUKIO SHIMIZU, J. Pinus na silvicultura brasileira. Embrapa Florestas. Sao Paulo, 2004.
- ZOGBI, O. O papel na vida do Brasil. O papel, p. 51. Brasil, octubre 2003.
- Pàgina web de l'empresa Klabin ([www.klabin.com.br](http://www.klabin.com.br)). 15 d'agost de 2005.
- Pàgina web de BRACELPA ([www.bracelpa.org.br](http://www.bracelpa.org.br)). 15 d'agost de 2005.
- Pàgina web de ABTCP ([www.abtcp.org.br](http://www.abtcp.org.br)). 15 d'agost de 2005.
- Pàgina web de ASPAPEL ([www.aspapel.es](http://www.aspapel.es)). 15 d'agost de 2005.