



Universitat de Girona

# AVALUACIÓ DEL PROCÉS DE DESINTEGRACIÓ DE PAPERS RECUPERATS

**Josep PUIG i SERRAMITJA**

**ISBN: 84-689-0622-0**

**Dipòsit legal: GI-I400-2004**

<http://hdl.handle.net/10803/7782>

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Girona

**Tesi doctoral**

**AVALUACIÓ DEL PROCÉS DE  
DESINTEGRACIÓ DE PAPERS RECUPERATS**

**Josep Puig Serramitja  
2004**



**Pere Mutjé Pujol**, Catedràtic d'Escola Universitària d'Enginyeria Química del Departament d'EQATA de la Universitat de Girona, com a director de tesi,

**M. Àngels Pèlach Serra**, Professora Titular d'Enginyeria Química del Departament d'EQATA de la Universitat de Girona, com a directora de tesi,

CERTIFIQUEN: que l'Enginyer Industrial, especialitat Química Josep Puig Serramitja ha realitzat, sota la seva direcció i tutela, el treball que porta el títol "Avaluació del procés de desintegració de papers recuperats", que presenta per optar al grau de Doctor.

I per a què consti als efectes oportuns, signen la present a Girona, 8 de Setembre de dos-mil quatre.

Dr. Pere Mutjé Pujol

Dra. M. Àngels Pèlach Serra



**a les persones que m'estimo**





# ÍNDEX



---

---

# ÍNDIX

<b>1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS</b>	<b>1</b>
1.1. Aspectes tècnic-econòmics del reciclat	3
1.1.1. El sector del reciclatge del paper utilitzat a Espanya	10
1.1.2. Procés de reciclatge del paper	12
1.2. La desintegració de paperot	13
1.3. Justificació i objectius	15
1.4. Bibliografia	16
<b>2. FONAMENTS TEÒRICS</b>	<b>17</b>
2.1. Introducció	19
2.2. Desintegració de paperot	19
2.2.1. La tecnologia del desfibratge	19
2.3. Aspectes energètics i temps de desintegració	28
2.4. Generalitats sobre fluxos de suspensions fibroses	40
2.4.1. Generalitats sobre la reologia	40
2.4.2. La viscositat	40
2.4.2.1. Energia necessària per fluir	42
2.4.2.2. Principals paràmetres que influencien la viscositat d'un líquid	43
2.4.3. Diferents comportaments reològics dels fluids	43
2.4.4. Propietats dels fluids que afecten la seva viscositat	46
2.4.4.1. Comportament reològic de les suspensions fibroses de baixa consistència.	48
2.4.4.2. Efecte de la fracció massica en el comportament reològic de les suspensions fibroses	49
2.4.5. Floculació i forces que lliguen la xarxa fibrosa	52
2.5. Caracterització de les suspensions fibroses	57
2.5.1. Força de cisallament	57
2.5.2. Potència necessària per a la “fluidització”	58
2.5.3. Velocitat mínima per arribar a la fluidització	59
2.5.4. Descripció de la suspensió fibrosa per viscositat	60
2.6. Caracterització de la desintegració	62
2.7. Caracterització dels “púlpers” amb fluids newtonians	66
2.7.1. Mètode de Metzner i Otto	66
2.7.2. Mètode de caracterització	68
2.7.2.1. Obtenció de la corba model	70
ANNEX 2.1. Equipaments industrials per l'operació de desintegració	75
A2.1.1. Introducció	77
A2.1.2. Púlpers de baixa consistència.	77
A2.1.3 Púlpers d'elevada consistència	79
A2.1.3.1. Púlper helicoïdal	80

A2.1.4. Darreres millores	85
A2.1.5. Púlpers no-convencionals. Tecnologia d'explosió de vapor.	90
A2.1.6. Púlpers de doble rotor	94
A2.1.7. Mesclador planetari.	95
A2.1.8. Cadena de desfibrat	96
2.8. Bibliografia	99
<b>3. MATERIALS, EQUIPS I METODOLOGIES</b>	<b>105</b>
3.1. Introducció	107
3.2. Materials	108
3.2.1. Paper Estucat d'Alta Qualitat (PQ)	108
3.2.2. Paper Revista o "Magazine" (PR)	109
3.2.3. Paper Fotocòpia (PF)	110
3.3. Equips	113
3.3.1. La Cel·la Pulcel	113
3.3.2. Analitzador de xarxa circuitor CVMK-4C	116
3.3.3. Aparell Sommerville.	118
3.3.4. Suport Informàtic	119
3.4. Metodologies experimentals	120
3.4.1. Càlcul de la humitat relativa	120
3.4.2. Càlcul de la consistència o fracció màssica	120
3.4.3. Càlcul de l'Índex de Sommerville i temps de desintegració	121
3.4.4. Caracterització reològica del púlpers	122
3.4.4.1. Preparació de les dissolucions de glicerina	123
3.4.4.2. Determinació del pes específic de les dissolucions de glicerina	123
3.4.4.3. Determinació de la viscositat de les dissolucions de glicerina	123
3.4.4.4. Determinació de la potència bruta i energia consumida	123
3.4.4.5. Determinació de la potència al buit i diàmetre del rotor helicoidal	125
3.4.4.6. Determinació de la potència neta	126
3.4.4.7. Càlcul del nombre de potència ( $N_p$ ), Reynolds ( $Re$ ) i Froude ( $Fr$ )	127
3.4.4.8. Obtenició de les famílies de corbes $N_p$ - $Re$ que caracteritzen el púlpers per un volum i un rotor fixats	130
3.4.4.9. Càlcul dels paràmetres $k$ , $x$ i $y$ que caracteritzen el púlpers reològicament per un rotor i un volum fixats	131
3.4.4.10. Càlcul del factor de cisallament ( $\lambda$ ) per una suspensió de paperot	132
3.4.4.11. Determinació del pes específic de les suspensions papereres	133
<b>4. RESULTATS I DISCUSSIÓ</b>	<b>135</b>
4.1. Introducció	137
4.2. Anàlisi del temps de desintegració	138
4.2.1. Anàlisi de l'evolució de la desintegració	153
4.2.2. Estudi de les velocitats de desintegració mitjanes	157
4.2.3. Estudi de l'efecte del temps de desfibrat sobre la producció del procés	160
4.2.4. Anàlisi de la producció i la velocitat mitjana de desintegració	166
4.3. Aspectes energètics	171
4.3.1. Implementació industrial	175

---

4.3.1.1. Consum específic d'energia (SEC)	178
4.3.1.2. Potència consumida	182
4.3.2. Caracterització del consum energètic del "púlper"	185
4.3.2.1. Caracterització de l'eficàcia energètica del "púlper"	190
4.3.2.2. Caracterització dels diferents paràmetres energètics	194
4.3.2.2.1. Caracterització energètica del PQ	195
4.3.2.2.2. Caracterització energètica del PF	205
4.3.2.2.3. Caracterització energètica del PR	214
4.3.2.2.4. Caracterització energètica. Estudi conjunt	222
4.4. Viscositat aparent i energia de fluidització	229
4.4.1. Viscositat aparent	229
4.4.2. Potència de fluidització	238
4.5. Reologia del púlper	242
4.5.1. Modelització del púlper	243
4.5.1.1. Modelització del púlper equipat amb rotor helicoïdal	260
Annex A4.5.1. Modelització d'un púlper amb rotor helicoïdal	263
A4.5.1.1. Introducció	265
Annex A4.5.2. Modelització d'un púlper amb rotor pla	275
A4.5.2.1. Introducció	277
4.6. Factor de cisallament	283
4.6.1. Determinació del factor de cisallament	283
4.6.2. Determinació de l'energia dissipada a la suspensió	294
Annex A4.6.1. Potències brutes consumides per les suspensions	299
4.7. Bibliografia	307
<b>5. RESUM I CONCLUSIONS</b>	<b>309</b>
5.1. Resum del treball realitzat	311
5.2. Conclusions generals	321
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>325</b>

---

---

## **SÍMBOLS UTILITZATS**

---

---

## SIMBOLS UTILITZATS

$\varepsilon$	Energia volúmica
$\rho$	Densitat de fluid (kg/m <sup>3</sup> )
$\lambda$	Factor de cisallament (Pa·s)
$\nu$	Freqüència
$\eta$	Viscositat (Pa·s)
$\mu$	Viscositat dinàmica del fluid (Pa·s)
$\mu_a$	Viscositat aparent (Pa·s)
$\rho_{\text{AIGUA}}$	Pes específic de l'aigua a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{CEL·LULOSA}}$	Pes específic de la cel·lulosa a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{CENDRES}}$	Pes específic de la càrrega mineral a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta_D$	Rendiment energètic a la desintegració
$\xi_f$	Potència de fluidització
$\eta_{sf}$	Eficàcia de transmissió a les fibres (%)
$\rho_{\text{SUSPENSÍO}}$	Pes específic de la suspensió (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	Esforç de cisalla
$\tau_0$	Tensió llindar
$\tau_d$	Tensió de ruptura
$\omega_{\text{ROTOR}}$	Velocitat del rotor del púlper (rev/s)
<b>A<sub>i</sub></b>	Energia consumida per l'aigua per unitat de volum (kJ)
<b>C</b>	Concentració o consistència en %
<b>c</b>	Tan per 1 de cendres
<b>Ch</b>	Capacitat d'hidratació
<b>C<sub>m</sub></b>	Concentració màssica
<b>C<sub>v</sub></b>	Concentració volúmica
<b>d</b>	Diàmetre equivalent del rotor (m)
<b>D<sub>i</sub></b>	Diàmetre (cm)
<b>E<sub>0</sub></b>	Energia acumulada abans d'iniciar l'experiment (kW·h)
<b>E<sub>2min</sub></b>	Energia acumulada després dels dos minuts d'experiment (kW·h)
<b>E<sub>H2O</sub></b>	Energia de funcionament del púlper contenint únicament aigua (kJ)
<b>E<sub>∅</sub></b>	Energia de funcionament del púlper en el buit (kJ)



---

<b><math>E_T</math></b>	Energia total consumida per la suspensió (kJ)
<b><math>E_{TF}</math></b>	Energia total transferida a les fibres (kJ)
<b><math>E_{TS}</math></b>	Energia total transferida a la suspensió (kJ)
<b>F</b>	Flòculs o grumolls (%)
<b>Fr</b>	Nombre de Froude
<b>H</b>	humitat (%)
<b><math>h_i</math></b>	Alçada (cm)
<b><math>h_{TOTAL}</math></b>	Alçada total del rotor, en el nostre cas és de 21 cm
<b><math>I_{SV}</math></b>	Índex de Sommerville (%)
<b>m</b>	Massa tractada en una desintegració (kg)
<b>n</b>	Velocitat de l'agitador (rev/s)
<b>Nm</b>	Nombre de mescla
<b><math>N_p</math></b>	Nombre de potència o de Newton
<b><math>P_{b,2min}</math></b>	Potència bruta consumida després dels dos minuts d'experiment (W)
<b><math>P_{bruta}</math></b>	Potència bruta (W)
<b><math>P_{buit}</math></b>	Potència al buit (W)
<b><math>P_{H_2O}</math></b>	Potència de funcionament del púlper contenint únicament aigua (W)
<b><math>P_n</math></b>	Potència neta mitjana (W)
<b><math>P_{neta}</math></b>	Potència neta (W)
<b>PROD</b>	Productivitat del pulpejat (kg/h)
<b><math>P_T</math></b>	Potència total consumida per la suspensió (W)
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds
<b>S</b>	Superfície de revolució del rotor
<b>SEC</b>	Consum específic d'energia (kJ/kg)
<b>Si</b>	Energia consumida per la suspensió per unitat de volum
<b>St</b>	Superfície total de contacte amb la suspensió
<b><math>T_0</math></b>	Temperatura inicial abans d'iniciar l'experiment (°C)
<b><math>T_{2min}</math></b>	Temperatura final després dels dos minuts d'experiment (kW·h)
<b><math>t_D</math></b>	Temps de desintegració (min)
<b><math>\bar{V}_D</math></b>	Velocitat de desintegració ( $s^{-1}$ )
<b><math>W_H</math></b>	Pes humit de la mostra (kg)
<b><math>W_S</math></b>	Pes sec de la mostra (kg)
<b><math>X_m</math></b>	Fracció màssica (kg de sòlid / kg de suspensió)
<b><math>X_m</math></b>	Fracció màssica de pasta

# 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS



## 1. Introducció

El paper és un producte natural, reciclable, fabricat a partir de matèria renovable i, pels seus avantatges ambientals, està esdevenint el material del futur (Presta, 2003).

L'electrònica i la informàtica estan donant un impuls sense precedents a la comunicació i al comerç, i és en aquests camps, així com en l'educació, la higiene i la sanitat, on el paper hi té una presència cada cop més gran.

En aquest capítol es revisa amb un breu estudi l'evolució de la producció de paper a Espanya i es compara amb alguns països significatius d'arreu. Així, també s'estudia l'evolució de la recollida selectiva de paper com a mesura de l'estat de conscienciació dels consumidors i índex predictiu pel futur.

En aquest estudi sobre l'interès industrial i social del tema es recullen algunes dades i índex de la indústria del reciclatge de paper.

Donat que està plenament justificat estudiar aquest tema, aquest treball ha aprofundit en l'etapa de la desintegració del paper usat, donat que s'observa en la bibliografia actual que aquesta etapa ha estat una mica oblidada. Tot i que no és una etapa crítica del procés, sí que té importants implicacions econòmiques.

### 1.1. Aspectes tècnic-econòmics del reciclat

La producció de paper a Espanya ha augmentat durant els darrers cinquanta anys en més d'un milió de tones, fet que representa un creixement acumulat que multiplica per dos el creixement mitjà de la producció paperera a la Unió Europea. La indústria del paper a Espanya és un sector en expansió, que ha anat realitzant importants inversions amb l'objectiu de respondre al potencial creixement del mercat intern i per augmentar la seva presència en els mercats exteriors.

## Capítol 1

L'any 2001 la producció de paper i cartró a Espanya va augmentar un 7.7% fins a situar-se en 5.132.200 tones (ASPAPPEL, 2002) (Taula I.1.1). Aquest important creixement de la producció, que per primera vegada va arribar i superar el rècord històric de 5 milions de tones, reflexa un ritme de creixement de la indústria paperera espanyola molt per sobre del registrat a Europa, Estats Units, Canadà i Japó.

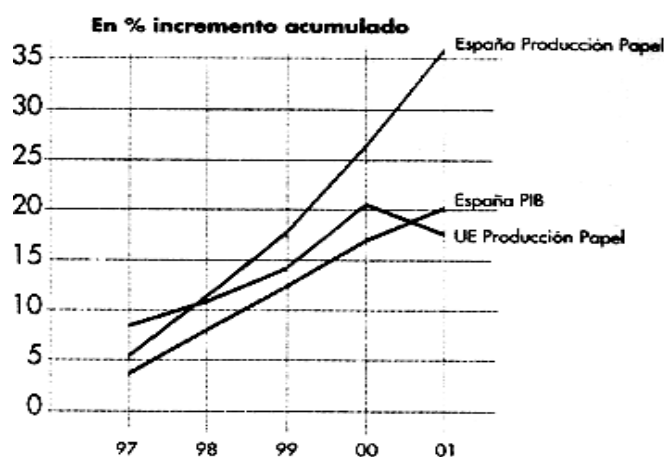
A Europa, amb 88 milions de tones l'any 2001, la producció de paper va disminuir un 2,5% en relació a l'any anterior, tot i que l'any 2000 havia estat un any rècord, ja que per primera vegada la producció europea havia superat la dels Estats Units. Als Estats Units la producció de paper va disminuir un 5,8% el 2001, també el Canadà (-5,2 %) i el Japó (-5,2%) van experimentar un considerable descens.

**Taula I.1.1:** Producció de Paper i Cartró a Espanya durant el període 1997-2001 (ASPAPPEL, 2002)

(En milers de tones)	1997	1998	1999	2000	2001	% $\frac{2001}{2000}$
Paper premsa	143,5	191,7	241,7	288,4	316,2	+9,6
Impressió i escriptura	900,5	884,6	938,6	1018,2	1097,0	+7,7
▪ Impressió estucat	401,1	457,1	511,2	523,5	510,2	-2,5
▪ Impressió no-estucat	499,4	427,5	427,4	494,7	586,8	+18,6
Higiènic i sanitaris	328,0	393,3	416,4	432,6	468,9	+8,4
Cartró ondulat	1596,0	1708,7	1787,9	1919,3	2123,1	+10,6
▪ Per ondular	740,2	826,6	854,1	928,6	1090,3	+17,4
▪ Kraft liner	28,0	18,9	29,3	18,6	20,8	+11,8
▪ Test liner	435,2	493,1	503,2	512,8	523,4	+2,1
▪ Bicos i cuiros	392,6	370,1	401,3	459,3	488,6	+6,4
Sacs Kraft	157,7	157,0	143,7	168,6	156,4	-7,2
Cartronets	484,4	494,7	424,2	498,1	501,6	+0,7
Altres	357,7	366,3	423,3	438,6	469,0	+6,9
<b>TOTAL</b>	<b>3967,8</b>	<b>4196,3</b>	<b>4435,8</b>	<b>4763,8</b>	<b>5132,2</b>	<b>+7,7</b>

El creixement del sector paperer a Espanya se situa molt per sobre del PIB, que va augmentar un 2,8% i contrasta amb l'índex de Producció Industrial, que va disminuir un 1,2% l'any 2000 (figura 1.1.1).

Des de 1997 la producció de paper a Espanya ha crescut un 36,1%, augmentant prop de 1,2 milions de tones, mentre que el PIB va registrar un increment acumulat del 20,2%. En aquest període la producció paperera europea va créixer un 17,5%. Aquestes dades confirmen l'important ritme de creixement del sector paperer espanyol, que és una indústria en expansió.



**Figura 1.1.1:** Evolució en % d'increment acumulat de la producció de paper a Espanya i la UE, i del producte interior brut (PIB) a Espanya (ASPAPPEL, 2002).

En els últims anys, també s'ha produït un procés de redimensionament de les plantes de producció, que ha permès una important millora de la productivitat i competitivitat. La producció anual per treballador ha crescut un 71% els darrers 10 anys, passant de 226 a 386 tones.

Si a començaments de la dècada dels 90 només un 4% de les fàbriques de paper i el 28% de les de pasta tenien una capacitat de producció superior a les 100.000 tones anuals, avui el 14% de les plantes papereres i el 47% de les de cel·lulosa superen aquesta producció anual.

El consum de paper l'any 2001 es va situar en 6.398.200 tones (Taula I.1.2) amb un descens del 6,2% respecte l'any anterior. Al marge d'aquest descens, el cert és que la

diferència existent entre consum i producció representa pel sector un considerable potencial de creixement. A més, el consum per càpita a Espanya (158 kg) se situa encara molt per sota del dels països del nostre entorn, com França (193 kg), Itàlia (190 kg), Alemanya (233 kg) o Estats Units (332 kg).

**Taula I.1.2:** Consum de paper i cartró a Espanya durant el període 1997-2001 (ASPAPPEL, 2002)

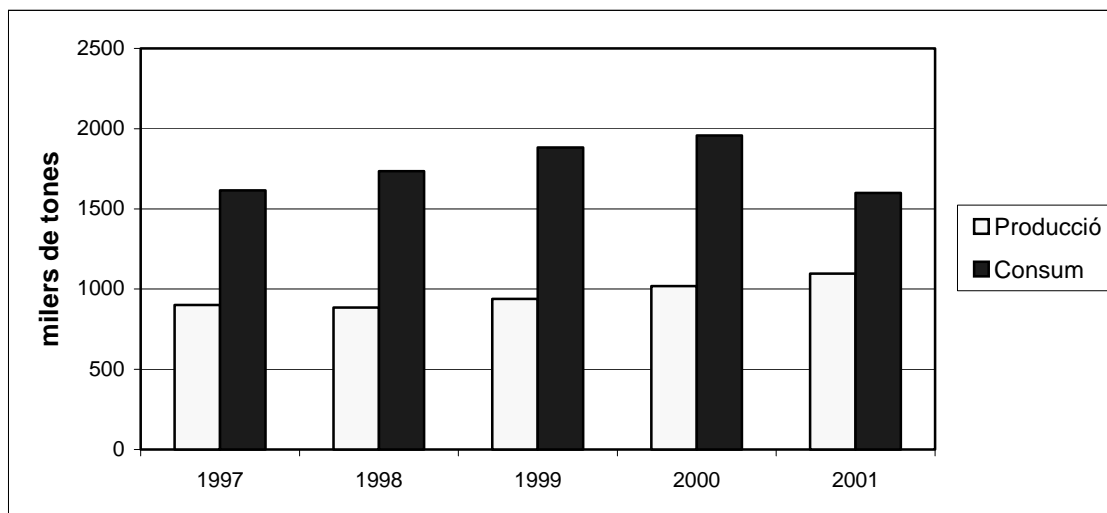
(En milers de tones)	1997	1998	1999	2000	2001	% $\frac{2001}{2000}$
Paper premsa	490,6	565,9	632,5	666,3	632,6	-5,1
Impressió i escriptura	1614,4	1734,3	1882,4	1957,0	1597,9	-18,3
▪ Impressió estucat	844,1	924,4	991,5	995,9	700,9	-29,6
▪ Impressió no-estucat	770,3	809,9	890,9	961,1	897,0	-6,7
Higiènic i sanitaris	374,7	426,8	446,7	454,8	513,6	+12,9
Cartró ondulat	2110,0	2276,4	2345,4	2571,5	2506,1	-2,5
▪ Per ondular	864,9	950,8	982,6	1104,9	1082,3	-2,0
▪ Kraft liner	446,3	484,5	504,8	520,6	455,4	-12,5
▪ Test liner	402,8	450,7	442,3	467,0	469,5	+0,5
▪ Bicos i cuiros	396,0	390,4	415,7	479,0	498,9	+4,2
Sacs Kraft	100,8	110,9	113,5	133,6	105,2	-21,3
Cartronets	440,6	392,0	402,1	437,1	503,2	+15,1
Altres	467,5	565,8	613,3	603,5	539,6	-10,6
<b>TOTAL</b>	<b>5598,6</b>	<b>6072,1</b>	<b>6435,9</b>	<b>6823,8</b>	<b>6398,2</b>	<b>-6,2</b>

Tot això implica importants possibilitats de desenvolupament per la indústria paperera espanyola. En els darrers anys, els fabricants de paper i cartró han invertit més de 360 milions d'euros en millorar les instal·lacions, i en un futur immediat estan previstes inversions superiors als 800 milions d'euros. D'aquesta manera, la indústria paperera espanyola podrà satisfer en gran mesura la demanda interna, es podran reduir les importacions i augmentarà la seva presència en els mercats exteriors.

Les taules I.1.1 i I.1.2 mostren, respectivament, les produccions i consum de paper i cartró a Espanya detallat segons les tipologies de paper i cartró més importants.

Entre elles es troba la tipologia impressió i escriptura detallada en estucat i sense estucat. Si s'analitzen les dades de la producció total de paper en el període 1997-2001 s'observa un creixement de la producció del 29,3 %, superior al creixement experimentat pel total d'impressió i escriptura que ha estat del 21,8%. La producció de paper no estucat (utilitzat freqüentment en oficines, fotocopiadores...) ha experimentat un creixement del 17,5% en el mateix període. Aquests papers tenen una quota de mercat cada dia superior.

Si observem les dades referents a la producció i consum de paper d'impressió i escriptura (Figura 1.1.2) d'entrada s'observa que Espanya és deficitària en paper d'escriptura. També s'observa que el consum d'aquest tipus de paper va augmentant fins a l'any 2000 on el consum gairebé duplica la producció. L'any 2001 va ser atípic en la indústria paperera, en el que es va observar un descens en el consum de paper (no només de la tipologia impressió i escriptura) però en canvi la producció (de totes les tipologies de paper) va augmentar.



**Figura 1.1.2:** Producció i consum de paper d'impressió i escriptura en milers de tones durant el període 1997-2001 (ASPAPPEL, 2002).

Des d'un punt de vista de producció, el paper no-estucat representa un 10% del total a l'any 2000 en quan a consum representa un 14% respecte aquest mateix any.



Per satisfer el consum de paper i cartró, Espanya importa paper manufacturat com es desprèn de la Figura 1.1.2. Del total de les importacions el paper no-estucat representa respectivament el 62 % (2001), el 50 % (2000) i el 38 % l'any 1997.

Per poder satisfer la demanda de paper Espanya produeix pastes verges, 1.720.000 Tones l'any 2001, importa pastes verges, 735.000 tones també l'any 2001, i exporta aquest mateix any 812.500 tones.

Malgrat que el paper no solament està format de fibres, la producció de pastes verges (tenint en compte les importacions i les exportacions) és de 1.642.500 tones que no és suficient per produir les 5.132.000 tones de paper que es van produir a Espanya l'any 2001. Espanya cobreix aquest diferencial amb fibres reciclades.

El reciclatge és una font de fibres que fa molt més sostenible el sector de la producció i consum de paper a Espanya i al món.

Per una producció total de 5.132.200 tones de paper nou, es van utilitzar com a matèria primera 4.196.900 tones de paper recuperat, el que suposa un increment del 8,3%. Donat que la recollida de paper utilitzat a Espanya va ésser a 3.496.200 tones (un 5,4% més que al 2000), es va registrar un dèficit de 16,7%, que va haver de suplir amb la importació de paper recuperat d'altres països.

En termes absoluts la recollida de paper recuperat es va incrementar en 177.700 tones l'any 2001 mentre que la indústria va utilitzar 322.000 tones més de paper recuperat com a matèria primera, tenint en compte l'important creixement de la recollida, el dèficit de paper recuperat es va veure incrementat.

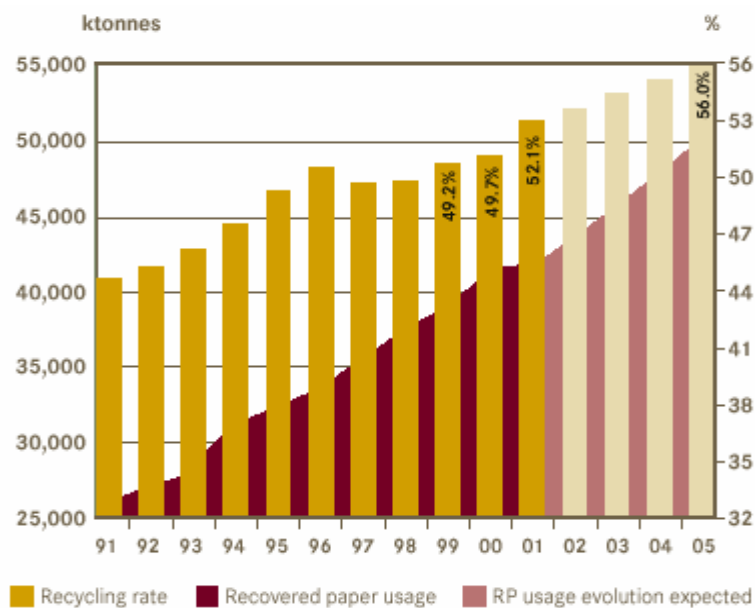
El paper recuperat s'ha convertit en una matèria amb la que es comercia internacionalment com qualsevol altre matèria primera o producte. Donada la importància que té el paper usat, totes les indústries involucrades d'alguna manera en el reciclatge de paper i que estan agrupades en la CEPI (Confederació Europea d'Indústries del paper), a la qual pertany ASPAPEL (Associació de Productors de Paper Espanyols), ERPA (Associació Europea de Paper Recuperat) i FEFCO (Federació Europea de productors de cartró) van adoptar voluntàriament l'any 2000

“La Declaració Europea sobre la recuperació i el reciclatge de paper” en la que es comprometen en la millora i protecció del medi ambient a llarg termini (CEPI, 2000).

Els productes forestals, una vegada utilitzats poden començar una nova vida com a matèria primera al ser recuperats selectivament. Aquest procés suposa que el bosc és una font de matèries primeres renovables i que el cicle ecològic és tancat i equilibrat.

Els signants de “**La Declaració Europea sobre la recuperació i el reciclatge de paper**” es comprometen a:

- Reduir la producció de residus en tots els processos del cicle de vida del paper i el cartró.
- Millorar el rendiment de les matèries primeres i de les auxiliars.
- Optimitzar els sistemes de recuperació posant els seus coneixements al servei dels responsables de la recuperació de paper pel seu reciclatge.
- Desenvolupar millores tècniques i ambientals estimulants i donant suport a la recerca.
- Augmentar la sensibilitat sobre el reciclatge del paper informant als consumidors de la seva funció en el cicle del paper.
- Finalment, els signants d'aquesta declaració acorden prendre les mesures necessàries per assegurar que a l'any 2005 es reciclarà almenys el 56% del paper i el cartró utilitzats a Europa. (Figura 1.1.3).



**Figura 1.1.3:** Evolució de la taxa de reciclatge i de la taxa de utilització de paper recuperat i la seva evolució teòrica fins al 2005 (CEPI, 2000).

Tenint en compte els augments estimats del consum de paper i cartró, l'objectiu del 56% en la taxa de reciclat, significaria que uns 10 milions de tones més seran reciclats voluntàriament per la indústria paperera europea.

A la pràctica és impossible recollir i reciclar tot el paper que es consumeix. Algunes classes de paper (papers sanitaris, paper de paret...) degut al seu ús final no es podran reciclar mai. Es creu que aquests tipus de paper representen entre un 15 i un 20% del total del paper i cartró que es consumeix. Tot i que la situació varia considerablement entre els diferents països, la indústria del paper i el cartró creu que encara es poden assolir nivells de reciclat superiors a nivell europeu.

### 1.1.1. El sector del reciclatge de paper utilitzat a Espanya

Actualment a Espanya es recupera pel seu reciclatge el 54,6% del paper i el cartró que es consumeix, com es pot veure a la taula I.1.3. La taxa de recollida, que a l'any 2000

es situava al 48,6%, va experimentar al 2001 un creixement de quasi sis punts percentuals. Aquest creixement de la taxa de recollida ens situa lleugerament per sobre de la mitjana europea (52%), però molt lluny encara de països com Alemanya (69,8%), Finlàndia (67,3%), Àustria (65,8%) o Suècia (63,3%).

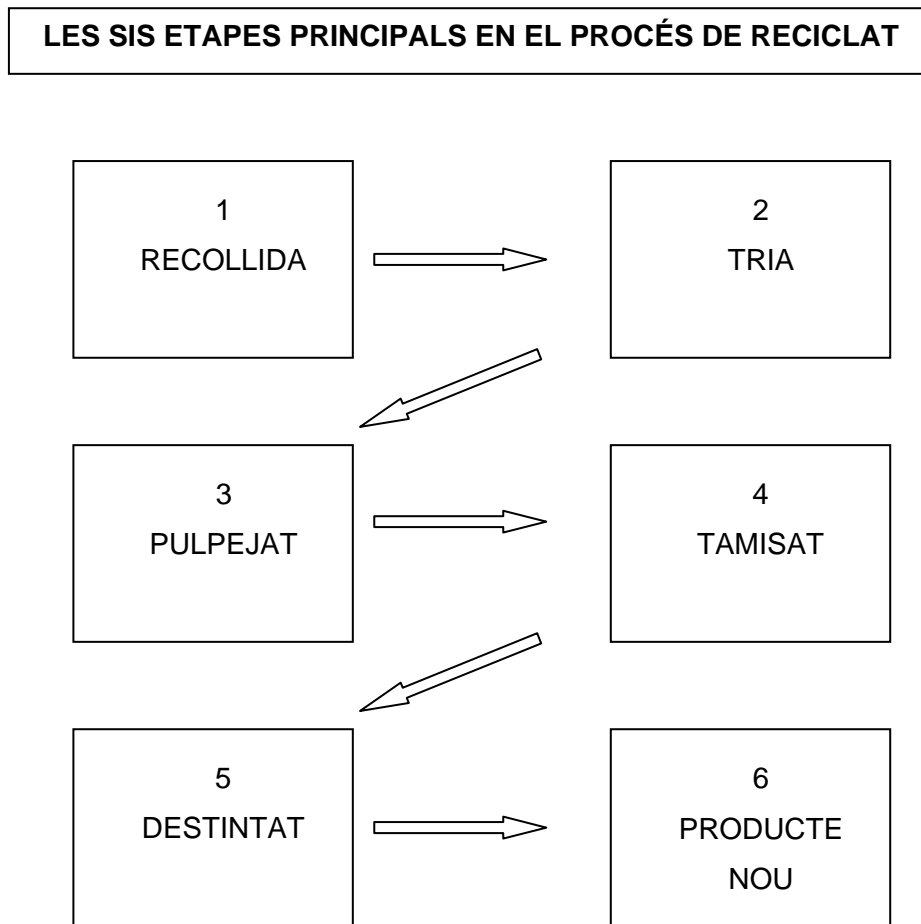
**Taula I.1.3:** Taxes de recollida de paper (en milers de tones) a Espanya durant el període 1997-2001 (ASPAPPEL, 2002).

Milers de tones	1997	1998	1999	2000	2001	% 01/00
RECOLLIDA APARENT	2.354,2	2.634,5	2.963,4	3.318,5	3.496,2	+5,4
IMPORTACIÓ	716,4	815,2	706,2	660,0	771,5	+16,9
EXPORTACIÓ	38,4	53,4	60,6	103,6	70,8	-31,6
CONSUM <sup>(1)</sup>	3.032,2	3.396,3	3.609,0	3.874,9	4.196,9	+8,3
TAXA DE RECOLLIDA(%) <sup>(2)</sup>	42,0	43,4	46,0	48,6	54,6	-
TAXA DE UTILITZACIÓ(%) <sup>(3)</sup>	76,4	80,9	81,4	81,3	81,8	-
TAXA DE RECICLATGE(%) <sup>(4)</sup>	54,2	55,9	56,1	56,8	65,6	-
CONSUM PASTA EQUIVALENT	2.638,0	2.954,8	3.139,8	3.371,2	3.651,3	-

- (1) Paper que es recicla com a matèria primera.
- (2) Recollida del paper recuperat expressat en percentatge sobre el consum de paper cartró.
- (3) Consum de paper recuperat expressat en percentatge sobre la producció de paper i cartró.
- (4) Consum de paper recuperat expressat en percentatge sobre el consum de paper i cartró.

Durant els últims cinc anys s'ha incrementat la recollida de paper en 1.371.000 tones, gràcies en la seva major part, a la col·laboració dels ciutadans, que han participat molt activament a la recollida selectiva de paper i cartró dels nostres municipis. Al 2001, es va aconseguir una aportació mitjana al contenidor blau de 14 quilos per habitant. Per optimitzar la recuperació de paper i cartró utilitzats, és necessari millorar la dotació de contenidors, tant en número com en localització; incrementar la qualitat i especialment la freqüència dels serveis de recollida, i promoure l'ús correcte pels ciutadans a través de campanyes de sensibilització.

### 1.1.2. Procés de reciclatge del paper



**Figura 1.1.4:** Esquema del procés del reciclatge del paper

El procés del reciclatge del paper comença amb la recollida del paper usat, a continuació és necessària una classificació d'aquest paper, ja que és tècnicament impossible fabricar paper d'escriptura a partir de cartró per exemple. Un cop el paper recuperat i classificat arriba a la planta de paper, en primer lloc es sotmet a un procés de repulpejat (desintegració) durant el qual el paper es converteix en una suspensió aquosa i es produeix el despreniment i la dispersió de contaminants (grapes, adhesius de la capa d'estucat, i també la tinta) amb l'ajuda de diversos reactius químics.

## 1.2. La desintegració de paperot

La desintegració de paperot és la primera operació unitària en els processos de destintat (Bennington, 1998) però també té un paper important en les fàbriques de paper i cartronet. En aquests processos de fabricació es produeixen quantitats apreciables de paper i cartronet que es recicla internament i en paral·lel al propi procés de fabricació. Aquests papers i cartronets en general en forma de retalls provenen de la secció d'acabats de la pròpia fàbrica (rebobinats, tall d'ajust de mides...) i també de les trencades que es produeixen en el procés de fabricació. Aquests materials un cop desintegrats s'incorporen en petits percentatges al procés principal.

També la desintegració és la primera operació unitària en les fàbriques que produeixen papers i cartronets sense procés de destintat, però aplicant tecnologies de dispersió de tinta i contaminants. Es el cas de fàbriques de papers tenyits, tissú reciclat sense destintats i capes de tripa i revers en la fabricació de cartronet. La desintegració permet bombar la suspensió a les successives etapes dels processos paperers, depuracions, flotacions, dispersió, rentat...

El grau de desfibrat o individualització (Vilaseca, 2000) de les fibres és un aspecte important a l'hora de avaluar l'etapa de desintegració de papers recuperats. Una bona suspensió de pasta destintada ha de estar exempta de pastilles o paquets fibrosos no desintegrats si es vol obtenir un bon rendiment de pasta en la depuració i una bona qualitat del paper. Íntimament associat al nivell de desfibrat de la suspensió està el consum d'energia pel grau tan elevat d'incidència en els costos de producció.

Un segon objectiu que es pretén amb la operació de desintegració és el despreniment de la tinta. L'alliberació i dispersió de la tinta ha de permetre la seva eliminació en els processos de flotació i rentat. La tinta no despresa, únicament pot ésser eliminada conjuntament amb la fibra a la que va associada, amb la consegüent pèrdua de matèria primera.

Un increment en els temps de desintegració podria repercutir en un millor nivell d'individualització de les fibres i despreniment de la tinta, però a més d'incrementar els costos energètics, pot produir un diàmetre de partícula i contaminants excessivament

fragmentats que poden resultar de difícil eliminació. La tinta es pot redipositar en l'interior de les fibres, fenomen que acostuma a ser irreversible, o en les cavitats externes, menys problemàtic, però al cap i a la fi, seran partícules no estabilitzades en el si de la suspensió.

La desintegració del paperot (Pèlach, 1997) es pot dur a terme bàsicament de dues maneres diferents: en procés continu o en procés discontinu. Ambdues maneres es poden seleccionar per treballar a alta i baixa consistència presentant diferents avantatges i inconvenients. Es parla de baixa consistència quan aquesta està entre 3 i 8% i alta consistència quan varia del 8 al 18%. Recentment s'ha desenvolupat el procés de desintegració per explosió que aproxima al procés de desintegració de papers recuperats als processos de digestió química de les pastes verges.

Quan s'ha d'escollir un sistema de desintegració continu o bé discontinu hi ha diversitat d'opinions, cosa que no succeeix a l'hora d'escollir si la desintegració es realitza a alta o baixa consistència. En aquest sentit hi ha unanimitat: els processos de desintegració de fibres secundàries es realitzen a alta consistència.

L'avantatge més important que presenten els púlpers continus respecte els discontinus és la major capacitat d'operació per l'eliminació dels temps de càrrega i descàrrega i el fet que no es necessiten tines d'emmagatzematge massa grosses si el flux és continu. En canvi, pel que fa als productes químics emprats, en la desintegració en continu aquests han de ser universals perquè siguin eficients per a qualsevol tipus de paper i a més s'han d'addicionar de forma constant juntament amb aigua calenta, implicant un funcionament en continu de tots els equipaments, bombes, vàlvules i canonades i un elevat cost d'additius químics. Un desavantatge important dels púlpers en discontinu és la variació en la qualitat del material d'entrada. Aquesta variació pot provocar problemes de desintegració de la suspensió que cal solucionar amb una etapa posterior de despastillatge. Les proves de control de qualitat són més dificultoses i els costos de manipulació de material per introduir el paperot dins del púlper són elevats.

No obstant, en aquesta Tesi només s'abordaran els aspectes de la desintegració vinculats a l'individualització dels components del paperot.

### 1.3. Justificació i Objectius

Atès el que s'ha exposat anteriorment sobre la importància de la desintegració en els processos de reciclat i recuperació, la importància actual del reciclat i d'altra banda de la forta consciència mediambiental que farà que augmentin les taxes de recuperació de paperot i els pocs treballs presents en les publicacions especialitzades (Lombardo 1992; Savoilainen, 1991; Paraskevas, 1983) es planteja aquesta Tesi amb els següents objectius:

- Anàlisi del temps de desintegració necessari per assolir una fita fixa d'individualització dels components de la suspensió per a diferents paperots.
- Anàlisi dels aspectes energètics i de potència de la instal·lació en funció de les condicions de desintegració i l'objectiu d'individualització establert.
- Constatació dels resultats obtinguts amb les mesures i estimacions de viscositat aparent existents a la bibliografia.
- Modelització de la màquina de desintegració mitjançant fluids newtonians de forma que es pugui obtenir el Número de Potència del púlper en funció dels Números de Reynolds i de Froude.
- Càlcul i anàlisi dels factors de cisallament de les diferents suspensions com mitjà per a quantificar globalment les forces implicades en la desintegració (Fabry, 1999).



## 1.4. Bibliografia

**Presta, S. (2003):** Treball de Recerca de Doctorat. Universitat de Girona.

**Aspapel (2002):** Informe estadístic 2001.

**CEPI (2000):** Declaración Europea sobre la recuperación y el reciclaje de papel.

**Bennington, C.P.J.,et al. (1998):** Journal Pulp and Paper Science, 24 (11), 341-348.

**Vilaseca, F, Gou, M, Pèlach, M.A, Mutjé, P (2000):** Investigación y técnica del papel, 145, 423-438

**Pèlach, M.A. (1997):** Tesi Doctoral. Universitat de Girona.

**Lombardo,G. Muratore, E. (1992):** Revue ATIP (46), 3.

**Savolainen, A., Jussila, T., Nikula, S. (1991):** TAPPI Journal, 74(11), 147-153.

**Paraskevas, S. (1983):** TAPPI Pulping Conference, 139-143.

**Fabry, B. (1999):** Tesi Doctoral. Institut National Polytechnique de Grenoble.

## **2. FONAMENTS TEÒRICS**



## **2.1. Introducció**

En aquest capítol es descriuen els fonaments teòrics necessaris per a desenvolupar posteriorment la part experimental, així com les darreres aportacions que diferents autors han fet a l'operació bàsica de desintegració. Es descriu la desintegració de paperot, la tecnologia emprada per dur-la a terme i tots els conceptes relacionats: energia i temps de desintegració, reologia i caracterització de les suspensions fibroses, caracterització dels púlpers emprats en la desintegració, viscositat aparent i taxes de cisallament.

## **2.2. Desintegració de paperot**

La desintegració és la primera operació que es du a terme en un procés de fabricació de paper. Es defineix com l'acció mecànica que permet obtenir una suspensió fibrosa amb unes propietats determinades a partir de diferents matèries primeres. L'acció del desintegrador o púlper es pot limitar a obtenir una suspensió que es pugui bombar, o bé pot aportar prou energia al sistema per a dispersar completament les fibres.

L'objectiu principal de la desintegració dins el procés de destintatge de paperot es centra en obtenir una bona individualització de les fibres i, alhora, una separació eficient de les partícules de tinta de les fibres sense destruir la resta de contaminants presents emprant el mínim d'energia possible i evidentment, amb la màxima eficàcia.

### **2.2.1. La tecnologia del desfibratge**

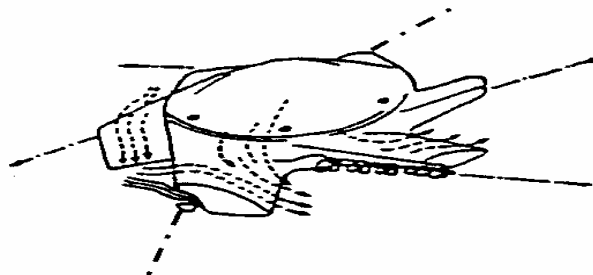
Fins aquests moments són pocs els autors que s'han interessat en la tecnologia i ciència de la desintegració en general, i encara menys en el camp del desfibratge de paperot. Fabry i Carré (2003) van desenvolupar una excel·lent revisió bibliogràfica sobre el desfibratge de paperot, que s'intenta recollir en aquest apartat de la tesi.

D'acord amb Paraskevas (1982 i 1983), el desfibratge de paperot té lloc de dues maneres diferents: per fregament mecànic i per efecte hidràulic.

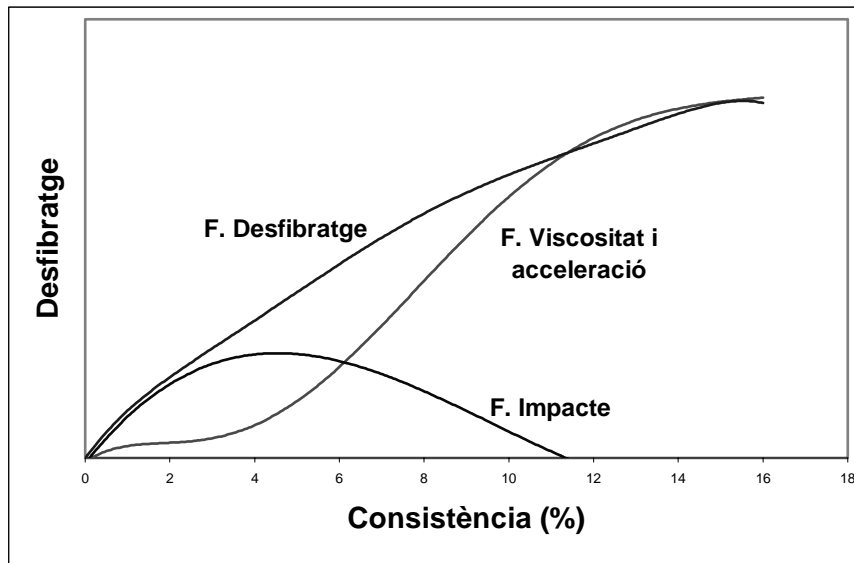
El desfibratge per fregament consisteix en sotmetre la suspensió de pasta a múltiples tractaments hidromecànics curts. Aquesta acció té lloc a gran velocitat prop dels elements rotatoris i del plat fix. Els canvis en la velocitat, la multiplicitat i elevada freqüència dels remolins i les zones de canvi de pressió generades entre el rotor i el plat fix provoquen el desfibratge. Aquestes forces són presents quan el paper està simultàniament a prop i fregant parts mecàniques estàtiques i rotatòries.

El desfibratge per efecte hidràulic fa referència a la interacció entre les fibres induïda pels diversos perfils de flux a diferents velocitats. En una suspensió de fibres en aigua, s'originen localment forces de cisalla provocades per les variacions locals de viscositat per la distribució no uniforme de les fibres en el púlper. En suspensions d'elevada consistència el moviment té lloc en forma de gradient. Cada punt té la seva pròpia velocitat, i per tant el seu propi gradient individual de velocitat (Paraskevas, 1982) Aquestes velocitats són sempre inferiors a les que hi ha com més a prop del rotor es troba.

Per estudiar els efectes de la consistència en el desfibratge i el consum de potència, Paraskevas ha utilitzat un rotor d'elevada consistència del tipus Tri-Dyne (figura 2.2.1). Els resultats que s'obtingueren es troben representats en figura 2.2.2. Quan la consistència augmenta, l'efecte de fregament perd la seva intensitat, i contràriament la interacció entre fibres esdevé cada vegada més pronunciada en augmentar la consistència, simplement perquè les fibres estan més properes entre elles i amb altres partícules sòlides. La interacció entre fibres continua augmentant amb la consistència fins que la viscositat és tan elevada que impedeix que hi hagi diferències de velocitat. Les forces de fricció entre fibres són molt menys intenses que les forces d'impacte, però molt més freqüents.



**Figura 2.2.1:** Rotor tipus Tri-Dyne utilitzat per Paraskevas (1982)



**Figura 2.2.2:** Efecte de la consistència sobre el desfibratge (Paraskevas, 1983).

Fins el 1997 no existia cap mètode per mesurar directament la fricció entre les fibres. Alguns autors, (Anderson et al., 1997 i Anderson et al., 2000) van fer diferents aportacions. Van presentar un mètode en el que s'estudiava l'efecte de diferents paràmetres (Kappa, introducció de NaCl, HCl, NaOH, blanqueig ECF o TCF) en pastes Kraft, i els resultats van mostrar que la hidratació de les fibres i l'inflament eren els factors predominants.

Siewert, (1984) proposa que el desfibratge és producte de les forces de tracció que actuen sobre el paperot o material a desintegrar. Aquestes forces de tracció es produeixen quan un tros de paper és subjectat per una part estàtica del púlper i una altra en moviment. També sorgeixen forces de tracció quan una part del paperot es fixa sobre un element mecànic estàtic i l'altra està sotmès a una acció de cisallament per part de la suspensió. Segons Siewert és indiferent que les parts mecàniques es desplacin en la suspensió o que la suspensió flueixi a través de les parts mecàniques del púlper. La magnitud de les forces de tracció depèn de la inèrcia de les pastilles i de la viscositat aparent de la suspensió. També es generen forces de tracció quan un tros de paper o pastilla penetra entre dos corrents de la suspensió que es mouen en sentit oposat. Aquests tres tipus de fenòmens tenen lloc simultàniament.

Segons Holik, (1988) les forces que actuen en el púlper es poden caracteritzar per la seva magnitud, freqüència, naturalesa i lloc on són induïdes cap als grumolls. La resistència del paper a aquestes forces depèn de la seva composició, tipus de fabricació i de l'extensió amb la qual el paper ha estat en contacte amb l'aigua.

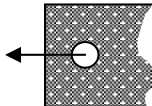
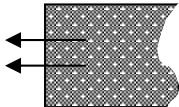
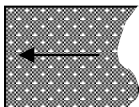
Si els grumolls s'han de reduir el màxim possible, les forces de tensió s'han d'aplicar als extrems oposats del grumoll. Hi ha diferents mètodes amb els quals les forces són produïdes i actuen sobre els grumolls:

- ➔ força induïda per "efecte d'impacte". Es tracta d'una força de fregament mecànic produïda entre el rotor del púlper i els deflectors localitzats per sota o al voltant de la perifèria del diàmetre exterior del rotor. En el cas dels pùlpers continus també intervé la platina d'extracció. Aquests elements estan propers però no es toquen, i això provoca que la pasta sigui hidràulicament forçada cap a aquest espai confinat on l'impacte de les fibres sobre aquestes parts promou l'increment de velocitat sobre la pasta per impuls hidràulic.
- ➔ força induïda per "efecte viscos". En aquest cas la suspensió que envolta el grumoll té una velocitat diferent. Les forces viscoses arrossegueu el grumoll i el trenquen. La interacció entre els grumolls augmenta amb la consistència a mesura que s'allunyen de la zona de fregament d'alta turbulència degut al fregament entre els sòlids que es mouen en diferents velocitats i direccions. Les forces de viscositat actuen lluny de les parts mecàniques.
- ➔ força induïda per "efecte d'acceleració". Es dona una interacció entre les fibres deguda als diferents corrents de flux que hi ha en el dipòsit. Si una part del grumoll és captat pel moviment del rotor, la resta és arrossegat per una acceleració violenta. El grumoll és sotmès a un fort estrès (desfibratge hidràulic) que depèn de l'acceleració de la suspensió i de la inèrcia al desplaçament de la part arrossegada.

A la taula II.2.1, es resumeixen i representen simbòlicament aquests tres mètodes d'aplicació de forces en la suspensió fibrosa.

Per tal de sotmetre el grumoll a esforç tallant, han d'actuar dues forces de diferent magnitud. La força més feble de les dues que poden actuar simultàniament, determinarà la tensió dins el grumoll. Qualsevol combinació dels tres mètodes que s'han citat es pot aplicar sobre el grumoll de fibres cel·lulòsiques.

Taula II.2.1: Mètodes d'aplicació de forces sobre la suspensió fibrosa (Holik, 1988).

Inducció de forces als grumolls de paper		
Tipus de força induïda	Tipus d'acció	Símbol
"Impacte"	Grumoll en contacte amb rotor i deflectors	
"Viscositat"	Suspensió amb velocitat relativa respecte el grumoll	
"Acceleració"	Reacció lenta del grumoll a una acceleració intensa de la suspensió	

Pèlach, (1997) fa una síntesi dels treballs de Paraskevas i Holik (1983), (1988), assimilant les forces de fregament de Paraskevas amb les forces d'enganxament/retenció de Holik. Aquesta síntesi comporta que aquestes siguin anomenades forces d'impacte. Les forces d'impacte, que contribueixen al desfibratge a baixes consistències, segons Paraskevas, tenen lloc per contacte entre els grumolls i els elements metàl·lics del púlper com el rotor, deflectors, parets, ...

De la mateixa manera s'assimilen les forces hidràuliques de Paraskevas a les de viscositat i acceleració de Holik, principals causants del desfibratge a mitjanes consistències (8% a 18%).

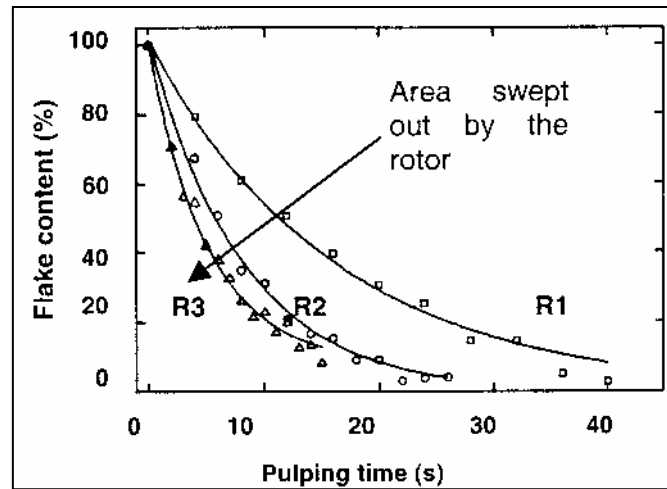
La taula II.2.2 reflexa els tres tipus de forces a que estan sotmesos els grumolls en la desintegració: impacte, viscositat i acceleració. Per a cada tipus de força s'especifica l'acció a què estan sotmesos, la intensitat i freqüència de l'acció, i la grandària de les partícules sobre les que aquesta acció té efecte.



Taula II.2.2: Forces induïdes als paquets fibrosos durant la desintegració.

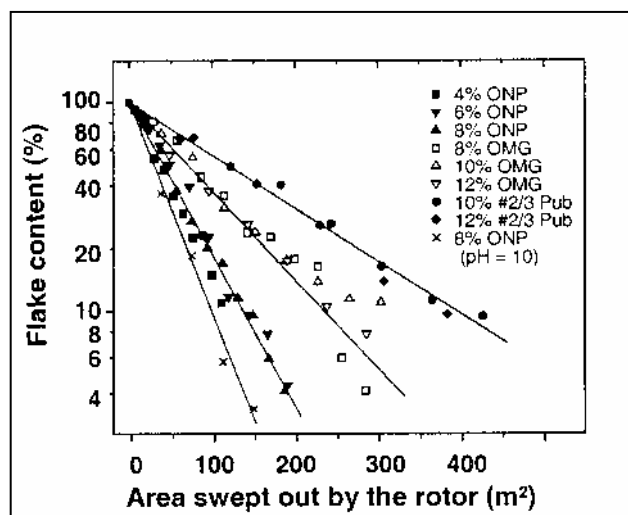
Tipus de força induïda	Acció	Intensitat	Freqüència	Grandària mínima de les partícules
<b>D'impacte</b>	Sobre els grumolls més propers al rotor	$\approx k N$	Feble comparada amb les d'efecte viscos	En funció de l'espai entre el rotor i els elements estacionaris, així com de les seves formes (5-10 mm)
<b>De viscositat</b>	En la suspensió que presenta una velocitat relativa respecte els grumolls	$\approx N$	Més freqüents que les d'impacte. Força efectiva entre partícules amb velocitats relatives diferents	En funció de la resistència del grumoll i de la tensió efectiva del cisallament
<b>D'acceleració</b>	Reacció dels paquets fibrosos sotmesos a una acceleració intensa	$\approx 10 N$	Equivalent a la de les forces d'impacte	Més petita que la de les forces de viscositat

Bennington et al., (1998a,b,c), desenvolupen un model matemàtic de desfibratge. Segons aquests autors, en el púlpers actuen tres tipus de forces que existeixen entre les fibres i el fluid (fibra/fluid), entre fibres en el seu moviment relatiu respecte de les altres (fibra/fibra), i entre la fibra i el rotor (fibra/rotor). El model desenvolupat suposa que la interacció entre fibra i rotor és el principal responsable del desfibratge (aquesta hipòtesi es basa en que amb diferents rotors s'observen diferències en el desfibratge). El model matemàtic segueix una cinètica de primer ordre i la progressió en el desfibratge és deguda al continuat contacte entre les fibres i el rotor. El grau de desfibratge depèn de les forces aplicades a la suspensió mitjançant el rotor i també de la resistència del paper a desfibrar. El model s'ha validat amb diferents mides de rotor helicoïdal. La influència de la mida del rotor es mostra en la figura 2.2.3, on R1, R2 i R3 corresponen a àrees creixents de superfície escombrada pel rotor.



**Figura 2.2.3:** Contingut en grumolls en funció del temps de pulpejat de paper premsa vell (ONP) en púlper helicoidal al 6% de consistència i velocitat de rotor de  $7.25 \text{ s}^{-1}$ . R1, R2 i R3 són àrees creixents de superfície escombrada pel rotor.

A la figura 2.2.4, es mostren diverses cinètiques de desfibratge en funció de l'àrea escombrada pel rotor. Es pot observar que:



**Figura 2.2.4:** Desfibratge en funció de l'àrea escombrada pel rotor per diferents tipus de paperot i condicions de pulpejat.

- es pot obtenir una corba característica d'una matèria per qualsevol consistència i per unes condicions químiques de pulpejat determinades.
- el model és funció del tipus de paper recuperat i el paper premsa vell (ONP) té una cinètica de desfibratge més ràpida que les revistes velles (OMG).
- el model és funció de les condicions químiques de pulpejat. La introducció d'hidròxid sòdic dona una cinètica de desfibratge més ràpida per ONP.

Fabry (1999) generalitza el concepte de viscositat aparent aplicat a les suspensions papereres mitjançant el factor de cisallament. El treball de Fabry mostra una evolució creixent del factor de cisallament amb la consistència fins arribar a una consistència crítica en que el factor de cisallament decreix.

Així mateix va estudiar la cinètica de desfibratge de ONP amb un agitador planetari (descriu posteriorment en l'annex A2.1). El desfibratge es va controlar determinant el contingut en flocs amb un aparell Sommerville (8/100 mm esclatxa). A la figura 2.2.5 es veu la relació entre el contingut en flocs i el temps de pulpejat.

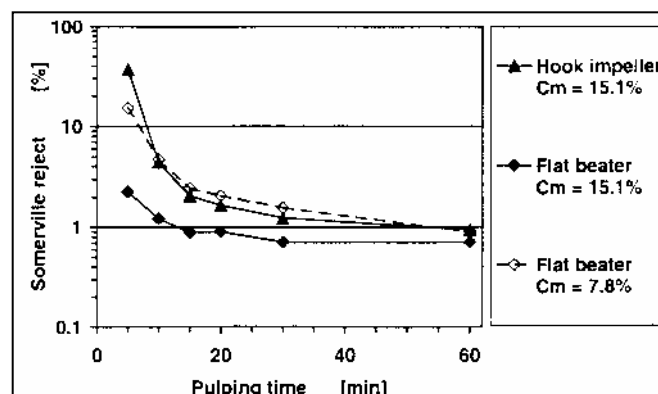


Figura 2.2.5: Desfibratge en funció del temps de pulpejat amb un mesclador planetari.

Es poden identificar diferents tendències:

- el desfibratge no es pot representar per la llei de primer ordre en els temps considerats (en aquest cas es pot obtenir una línia recta).
- com més gran és la consistència, més ràpid és el desfibratge. Això ja s'havia observat en estudis d'altres autors (Paraskevas, 1983, Anderson et al., 2000, Siewert, 1984; Holik, 1988).

- el púlper amb agitador pla és més ràpid que amb agitador de ganxo. La causa pot ser la diferència en l'àrea escombrada per l'agitador. Bennington et al. (1988), van demostrar que com més elevada és l'àrea escombrada per l'agitador helicoidal, més ràpida és la cinètica d'agitació.

Amaral et. al. (2000) estudien la desintegració de suspensions fibroses de pastes Kraft blanquejades de pi marítim i d'eucaliptus. Amb un púlper de laboratori es reflexa que la relació entre les energies per unitat de volum absorbides per l'aigua i per la pasta varia linealment amb la fracció màssica en un interval de consistències entre 0.5 i 4.5%. Aquest estudi permet classificar les pastes de paper en funció de la seva resistència a la desintegració.

Mutjé et al (2001) després de modelitzar un púlper amb rotor helicoidal aplica els conceptes de Metzner i Otto (1957) i Fabry (1999) a la desintegració de paperots. Treballant en un interval de consistències comprès entre el 6 i el 18 % s'observa que el factor de cisallament augmenta amb la consistència i no s'obté cap consistència crítica en que el factor de cisallament decreixi.

De la revisió bibliogràfica efectuada es desprèn que els diferents autors consultats, en la seva major part, expliquen qualitativament i d'una forma comprensible el tema de la desintegració en general, és a dir, referit a pastes verges i a paperot.

Les explicacions de Paraskevas (1983) són les més convenients a partir d'un púlper equipat amb un rotor especial.

Tant els treballs de Holik (1988) com de Siewert (1984) són difícilment aplicables, segons Fabry (1999) i Pèlach (1997) fa una síntesis dels treballs anteriors però continua prevalent l'idea qualitativa.

Bennington (1998a,b,c) demostra que l'eficàcia de la desintegració depèn de la superfície escombrada pel rotor.

Fabry (1999) i Mutjé et al. (2001), mostren que a partir de la generalització del concepte de viscositat aparent (Metzner i Otto, 1957) i l'aplicació de l'anàlisi dimensional (Roustan et al., 1985), és possible l'obtenció d'un factor de cisallament que englobi la totalitat de forces implicades en la desintegració.

### 2.3. Aspectes energètics i temps de desintegració

Habitualment en els processos industrials, la desintegració, sigui de pasta verge o de paperot és una operació descuidada o que rep poca atenció per part de les direccions tècniques de processos. És habitual veure les suspensions en moviment dins dels púlpers, sense un temps determinat i esperant ser descarregats a l'etapa posterior.

D'altra banda l'operació de desintegració constituïda simultàniament per tres suboperacions: agitació, barreja i desfibratge, requereix aportacions d'energia que no són gens menyspreables.

Diferents autors, (Paraskevas, 1983, Lombardo et al., 1992, Savolainen et al., 1991) han assenyalat que l'energia que es consumeix en l'operació de desintegració, posada en suspensió i desfibratge de la pasta, està entre un 5 % i un 15 % de l'energia que es consumeix en un procés no integrat de fabricació de paper. En un procés no integrat de fabricació de pasta a partir de paperot, el percentatge d'energia utilitzat en la desintegració és encara més gran.

L'energia consumida en el procés de desintegració de paperot s'utilitza per les operacions d'agitació, barreja, desfibratge i despreniment de tinta. La determinació quantitativa del percentatge d'energia utilitzat en cada una d'aquestes suboperacions simultànies és molt difícil, però amb tota seguretat, el desfibratge i la barreja són les operacions que consumeixen més energia.

Respecte el consum específic d'energia, quan es desintegra paperot, aquest és superior a causa de la seva major resistència en humit respecte de la pasta verge (Bennington, 1998). Així doncs, el consum energètic, que representa un cost directe en la fabricació de pasta a partir de paperot i que depèn del temps utilitzat, condiciona el cost de la qualitat de la pasta obtinguda.

Per avaluar el pulpejat, des d'un punt de vista d'energia consumida durant la desintegració, es fan servir expressions com l'energia dissipada (Vilaseca, 1999) o l'energia útil (Amaral, 1997). Una expressió acceptada és el consum específic d'energia calculat a partir de l'energia total consumida referida a la massa total pulpejada, segons la expressió de Merrett (1987):

$$SEC = \frac{E_T^t}{M} \quad (\text{eq. 2.3.1})$$

On:

SEC = consum específic d'energia (k·W·h/t)

$E_T^t$  = energia total consumida (k·W·h), per un temps t

M = massa de pasta seca desintegrada

Del total de l'energia dissipada en el procés de desintegració, una part provoca un augment de la temperatura de la suspensió i del púlpers, fent que millori el desfibratge i despreniment de la tinta.

En la desintegració a baixa consistència (3-8%), la major part de l'energia subministrada s'utilitza per a mantenir en moviment grans quantitats de líquid i no per a la separació directa de les fibres. Amb la desintegració a mitjana i alta consistència l'efecte de desfibratge es millora pel fregament entre fibres, molt més efectiu gràcies a la proximitat dels grumolls fibrosos. Treballar amb púlpers a baixa consistència té altres desavantatges importants entre els quals destaquen l'elevat consum d'energia, l'alta fragmentació dels contaminants i la poca eficàcia dels reactius químics ja que la velocitat de difusió és molt més lenta. L'estalvi aconseguit desintegrant a consistències altes (15-18%) respecte a unes consistències del 4-5% oscil·len al voltant del 20-35% d'energia elèctrica, 40-70% de vapor i 20% de productes químics (Koffinke, 1983; Hamilton, 1987; Merrett, 1987; Carré, 1995a,b,c,d). Degut a això, des de mitjans dels anys vuitanta la tendència de la indústria de destintatge de papers recuperats ha estat convertir els púlpers de baixa consistència en púlpers discontinus de mitjana i alta consistència.

Paraskevas (1982 i 1983) mostra que la potència per tona de pasta, consumida a l'etapa de desintegració evoluciona de forma decreixent i exponencialment quan augmenta la consistència de desintegració. No obstant, no aporta dades quantitatives sobre els consums de potència en general, donat que les seves experiències sempre són en l'entorn del rotor tipus Tri-Dyne de la casa Beloit.

Merret (1987) apunta reduccions substancials en el consum energètic (de l'ordre del 50%) quan es treballa a mitjanes consistències, respecte a les baixes, amb púlpers helicoidals fabricats per Tampella.

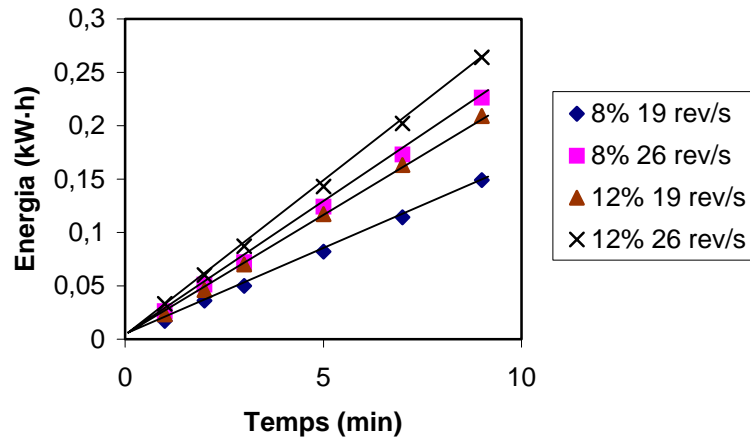
Savolainen (1991) demostra que, quan es desintegren diferents tipus de paperot amb diferents pulpers, es pot reduir el consum específic d'energia fins a un 30%, passant d'una consistència de desintegració del 3,5% al 7%.

Resultats experimentals trobats en el laboratori LEPAMAP (Vilaseca et al., 2000) confirmen aquests resultats. A la taula II.3.1 es poden observar els consums energètics totals per les condicions de treball analitzades, quan es treballa amb una barreja de 60% de paper diari i 40% de paper revista.

**Taula II.3.1:** Energia total consumida en funció de la consistència, velocitat del rotor i temps de desintegració.

Temps (min)	ENERGIA (kW-h)			
	8%		12%	
	19 rev/s	26 rev/s	19 rev/s	26 rev/s
1	0,017	0,026	0,023	0,033
2	0,036	0,051	0,046	0,060
3	0,050	0,072	0,070	0,087
5	0,082	0,124	0,117	0,143
7	0,114	0,173	0,163	0,202
9	0,149	0,226	0,209	0,264

La representació gràfica de l'evolució d'aquests consums energètics per cada temps, consistència i velocitat de rotor estan representats a la figura 2.3.1. Els resultats mostren que el consum energètic en el procés de desintegració varia linealment amb el temps per qualsevol consistència i velocitat d'agitació. També s'observa que l'energia consumida, per un determinat temps de desintegració, augmenta en augmentar la consistència i velocitat de rotor.



**Figura 2.3.1:** Evolució del consum energètic total en funció del temps de desintegració, per a les consistències i velocitats de desintegració sotmeses a estudi.

L'energia total dissipada en la suspensió pot determinar-se de manera aproximada a partir de l'energia total i l'energia consumida pel púlp per quant treballa al buit. Aquesta última representa l'energia que absorbeixen els fregaments interns del rotor per a diferents condicions de treball experimentades. Els consums energètics en buit per les diferents velocitats i temps de desintegració es mostren a la taula II.3.2. Tal i com es desprenen els valors presentats, el consum energètic en buit varia també de forma lineal amb el temps i és funció de la velocitat de rotor.

**Taula II.3.2:** Consums energètics en buit per les diferents velocitats i temps de desintegració

Temps (min)	Energia en buit (kW-h)	
	19 rev/s	26 rev/s
1	0.008	0.009
2	0.014	0.019
3	0.020	0.028
5	0.032	0.038
7	0.045	0.067
9	0.057	0.087

El càlcul de l'energia dissipada aproximada, expressada com la diferència entre l'energia total i el consum energètic en buit per les consistències i velocitats del rotor



d'aquest estudi, proporcionen els resultats de la taula II.3.3. La tendència dels valors d'energia dissipada coincideix amb la variació de l'energia total consumida, és a dir, la consistència i la velocitat del rotor determinen, conjuntament amb el temps d'aplicació, l'energia consumida per la suspensió. Val a dir que utilitzant la variable energia dissipada, els diferencials de consum d'energia per les diferents consistències i velocitats del rotor es redueixen.

**Taula II.3.3:** Energia dissipada en la suspensió en funció de la consistència de desintegració, velocitat de rotor i temps de desintegració.

Temps (min)	Energia dissipada (kW·h)			
	8%		12%	
	19 rev/s	26 rev/s	19 rev/s	26 rev/s
1	0.009	0.017	0.015	0.024
2	0.022	0.032	0.032	0.041
3	0.030	0.044	0.050	0.059
5	0.050	0.086	0.085	0.105
7	0.069	0.106	0.118	0.135
9	0.092	0.139	0.152	0.177

Respecte la consistència de desintegració, els resultats obtinguts són lògics, ja que prescindint de les pèrdues calorífiques, la consistència és la responsable de les forces induïdes per la viscositat.

Per altra banda, la velocitat del rotor determina el nivell d'agitació en el púlper, dictant la freqüència dels impactes de la pasta amb el rotor i les parets laterals. Sabent que la velocitat i desplaçament de la suspensió disminueix a mesura que augmenta la seva distància al rotor, la velocitat d'agitació també serà responsable de les acceleracions relatives i per tant de la intensitat de fregament entre fibres. La major o menor intensitat d'aquestes forces provoca consums d'energia proporcionals.

Es pot obtenir una relació matemàtica entre l'energia dissipada i les variables de la desintegració, que permeten caracteritzar les forces que intervenen en el desfibrat, per a una determinada geometria de púlper i en funció de la matèria primera desintegrada.

$$E_d = k \cdot C^x \cdot N^y \cdot \lambda^z \cdot t \quad (\text{eq. 2.3.2})$$

On,

- k,x,y,z són constants característiques del púlper i de la matèria primera,
- C és la consistència expressada com kg de pasta per 1000 kg de suspensió,
- N es la velocitat del rotor expressada en revolucions per segon,
- t el temps en minuts,
- $\lambda$  el paràmetre que engloba les forces induïdes d'impacte, viscositat i acceleració (Pèlach 1997))
- $E_d$  l'energia dissipada en kiloJoules.

En aquest estudi s'obté una expressió del consum d'energia total en funció de la consistència, temps i velocitat del rotor mitjançant ajustaments per regressió múltiple, tal com es mostra tot seguit:

$$E = 7.322 \cdot C^{0.612} \cdot N^{0.814} \cdot t^{0.977} \quad (\text{eq. 2.3.3})$$

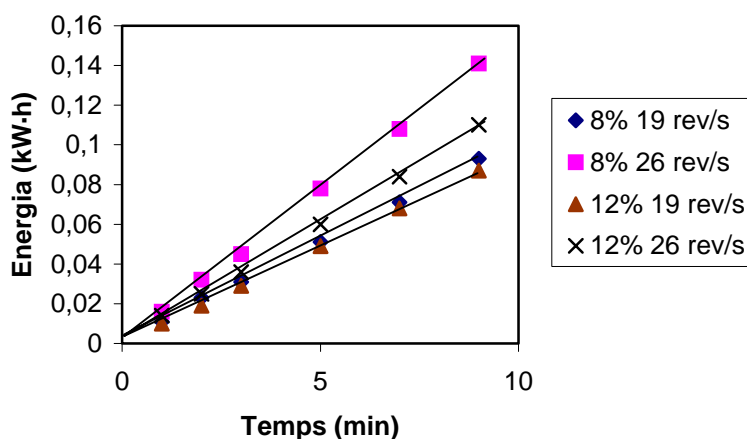
A destacar que el valor de la constant 7.322 engloba l'expressió  $k \cdot \lambda^z$ , i les unitats de temps són segons.

Tant industrialment com a nivell de laboratori, l'energia total consumida es refereix generalment a la quantitat de pasta produïda per poder obtenir dades comparatives de diferents energies (SEC) i s'expressa en kW·h per tona mètrica de pasta produïda. En la taula II.3.4 es mostren els consums específics d'energia per les variables estudiades. La gràfica de la figura 2.3.2, mostra la variació del consum específic d'energia en funció del temps de desintegració, consistència i velocitat del rotor. Poden observar-se diferències accentuades entre diferents condicions de treball. Així, les condicions experimentals  $C = 8-12\%$ ;  $N = 19$  rev/s presenten consums específics molt pròxims per a tots els temps de desintegració. Mentre que les condicions experimentals  $C = 8\%$ ;  $N = 26$  rev/s presenten els valors de SEC més elevats en l'interval de temps estudiat.

És necessari destacar que els consums específics d'energia s'han de referir a un índex de qualitat, si a partir d'aquests consums es volen prendre decisions que portin a una minimització de costos per una determinada qualitat, definida per un grau de desfibrat.

**Taula II.3.4:** Consum específic d'energia en funció del temps de desintegració per les diferents consistències i velocitats de desintegració.

Temps (min)	ENERGIA (kW-h)			
	8%		12%	
	19 rev/s	26 rev/s	19 rev/s	26 rev/s
1	0,011	0,016	0,010	0,014
2	0,023	0,032	0,019	0,025
3	0,031	0,045	0,029	0,036
5	0,051	0,078	0,049	0,060
7	0,071	0,108	0,068	0,084
9	0,093	0,141	0,087	0,110



**Figura 2.3.2:** Variació del consum energètic específic (kW-h/t) en funció del temps de desintegració, per les consistències i velocitats de desintegració estudiades.

Altres estudis desenvolupats darrerament són per exemple l'anàlisi del desfibratge en un púlper de tambor, on les forces involucrades en el desfibratge són degudes a la successiva barreja de la pasta. En el Centre Technique du Papier s'ha investigat la cinètica de desfibratge en un púlper de tambor pilot (Fabry, 2002), amb dos tipus de material (paperot coreà i americà/europeu). Per cada tipus de material la composició és de 90% ONP i 10% de OMG. El desfibratge és molt ràpid i l'índex de Sommerville sempre es manté inferior al 5% en condicions alcalines de pulpejat. L'augment de

temperatura de 40 a 65°C (o la disminució de sosa) no produeix canvis significatius en un pulpejat de 20 minuts.

També s'ha estudiat el pulpejat de 50% ONP i 50% de OMG en termes de cinètica de desfibratge (Fabry et al., 2002). Sembla que la introducció de química convencional (sosa, silicat, peròxid i sabó) dóna un desfibratge més ràpid que el pulpejat en condicions neutres (només amb sabó). De fet l'alcalinitat facilita el desfibratge perquè redueix la resistència de la xarxa fibrosa (Bennington et al., 1998b; Fabry et al., 2002). Amb un púlper semblant, Kankaanpää (2002) estudia la influència del procés principal i dels paràmetres de disseny en el desfibratge de tres tipus de paperot.

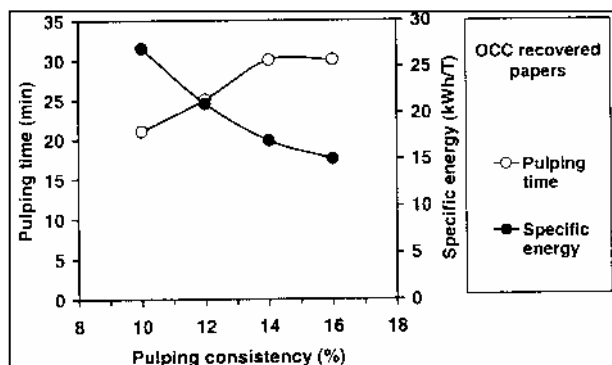
Com es representa en la taula II.3.5, el temps de pulpejat, així com el temps de parada i la llargada del tambor necessaris per aconseguir un nivell de desfibratge suficient depèn del tipus de paperot. Per exemple el paper revista requereix 5 minuts menys de pulpejat que el paper estucat de baix gramatge (LWC).

**Taula II.3.5:** Temps de pulpejat i consum específic d'energia necessaris per aconseguir un Índex de Sommerville de 5% (diàmetre de tambor de 2m, Cm=15%, 40°C).

	<b>Temps de pulpejat (min)</b>	<b>Energia específica (kWh/t)</b>
OCC	50	27
News/LWC	10	8
LWC	15	12

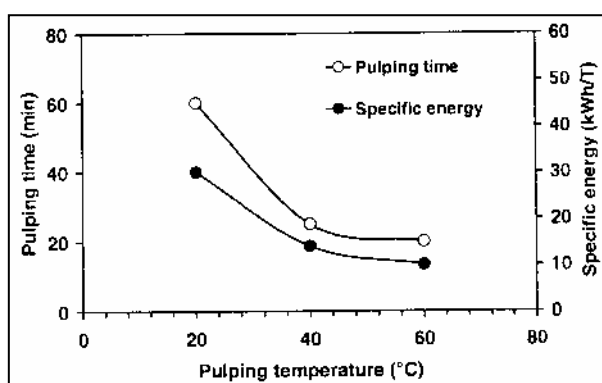
En relació als altres paràmetres es poden destacar els següents punts:

- com més elevada és la consistència, més gran és el temps necessari per aconseguir un nivell de desfibratge suficient, o més llarg ha de ser el tambor, tal com es representa en la figura 2.3.3. No obstant, aquest increment també es tradueix en un consum específic d'energia inferior, degut principalment a que l'energia necessària per fer girar el tambor és funció de la massa total en el seu interior, i com menys aigua, menys energia.



**Figura 2.3.3:** Efecte de la consistència de pulpejat en el temps necessari per aconseguir un Índex de Sommerville de 5% (0.15 mm).

- com més elevada és la temperatura més curt és el temps de pulpejat (i més curt el tambor) per aconseguir un desfibratge suficient (figura 2.3.4). L'increment de 40 a 60°C produeix canvis petits de fins al 20%. L'increment de temperatura és favorable, però s'ha vist en altres estudis que té algunes conseqüències negatives (Fabry et al., 2002).

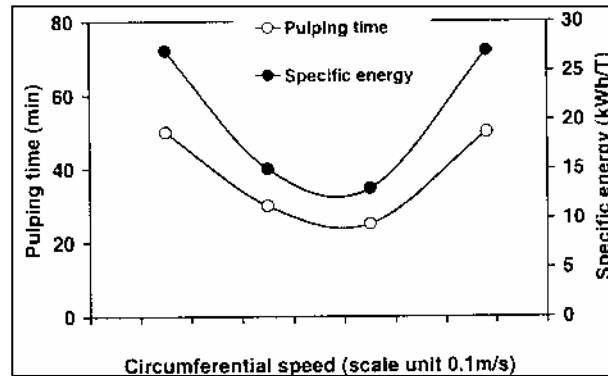


**Figura 2.3.4:** Efecte de la temperatura de pulpejat en el temps necessari per aconseguir un Índex de Sommerville de 5% (0.15 mm).

- La introducció del 1% de sosa pulpejant OCC permet reduir fortament el temps de pulpejat i el consum d'energia per aconseguir un desfibratge suficient (a una tercera part en comparació amb el pulpejat neutre).

Segons Kankaanpää (2002), el disseny del púlper de tambor és un punt d'interès. De fet, l'eficiència està relacionada amb el nombre i la força dels impactes generats en un cert període de temps, que equival a la llargada del tambor:

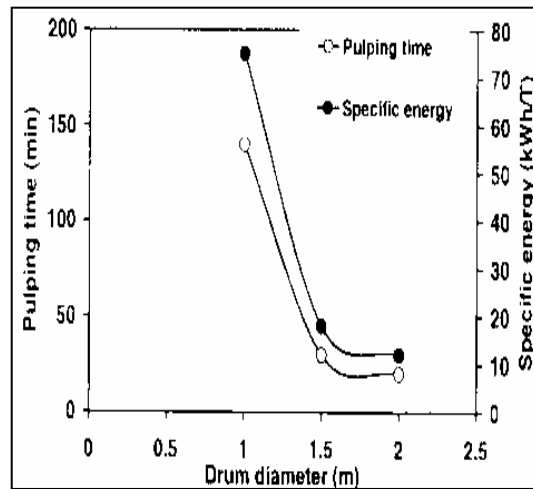
- la velocitat més eficient correspon a la caiguda més alta (velocitat tangencial relacionada amb el diàmetre del rotor i la velocitat de rotació). Com s'observa en la figura 2.3.5, petits canvis de velocitat prop del punt òptim produeixen canvis importants en el temps i l'energia de pulpejat, per tenir un mateix nivell de desfibrat.



**Figura 2.3.5:** Efecte de la velocitat del tambor en el temps necessari per aconseguir un Índex de Sommerville de 5% (0.15 mm).

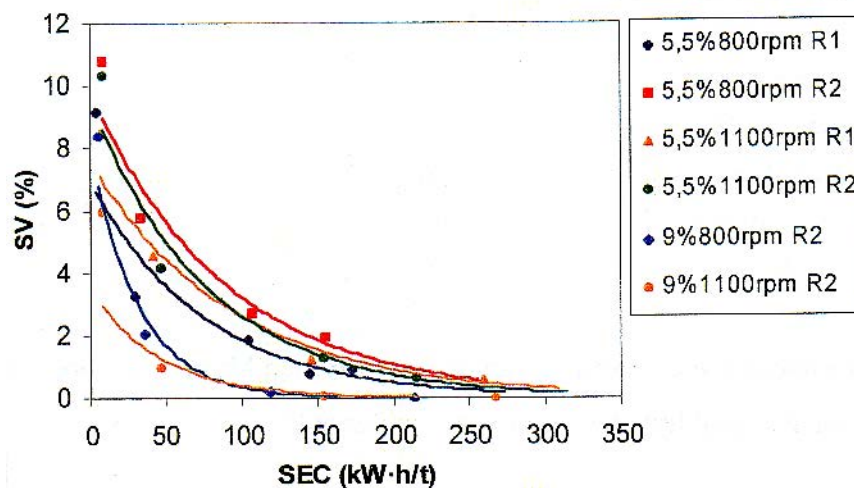
- en el seu tambor de 2 metres de diàmetre, un augment de 4 a 8 litres no produeix canvis significatius en el desfibrat.
- com més gran és el diàmetre del tambor més ràpid és el desfibratge (figura 2.3.6). Això dóna un marge d'operativitat en paperots difícils.

L'avaluació de l'etapa de desintegració requereix determinar el temps necessari i les condicions de treball que ofereixen un grau d'individualització de fibres acceptable amb el mínim cost energètic possible. D'aquí que cal valorar l'evolució del percentatge de grumolls obtinguts a les diferents condicions operatòries en funció de l'energia per tona de pasta consumida.



**Figura 2.3.6:** Efecte del diàmetre de tambor en el temps necessari per aconseguir un Índex de Sommerville de 5% (0.15 mm).

Una representació característica del percentatge de fibra no individualitzada, per a desintegracions en pasta mecànica, mesurada per l'índex de Sommerville vers el consum específic d'energia s'exemplifica en la figura 2.3.7.



**Figura 2.3.7:** Valors d'índex de Sommerville en funció del consum específic d'energia en desintegracions de pasta mecànica (Vilaseca, 1999)

Els aspectes més destacables de la revisió bibliogràfica es refereixen a l'evolució lineal de les diferents energies implicades en un procés de desintegració en augmentar el temps de desintegració.

La disminució del consum específic d'energia en augmentar la consistència també és un fet destacable observat per diferents autors, i amb diferents model de pulper. No hi ha pràcticament referències en quan a temps de desintegració i a un determinat nivell de desfibrat. Els estudis més significatius es refereixen a púlpers de tambor.



## 2.4. Generalitats sobre fluxos de suspensions fibroses

L'addició d'una petita quantitat de fibres cel·lulòsiques en l'aigua canvia considerablement les propietats hidrodinàmiques, i aquest canvi és més complex com més elevada és la concentració de fibres present en la suspensió. Les suspensions fibroses presenten una reologia, viscositat, comportament en conduccions i propietats molt característiques que s'analitzen tot seguit (Fabry, 1999).

### 2.4.1. Generalitats sobre la reologia

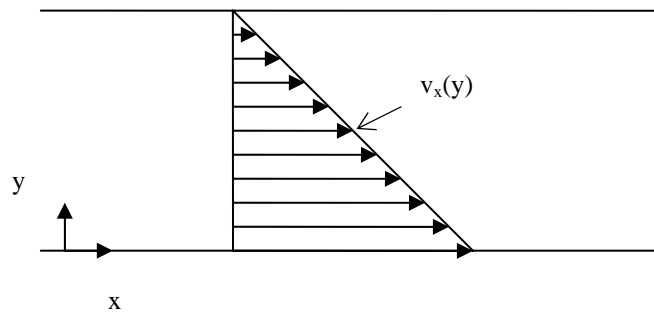
La reologia és la ciència que mesura i caracteritza les propietats de deformació i flux de les substàncies. Dins de les generalitats de la reologia, una de les més característiques és la viscositat, terme molt més precís que no la fluïdesa d'un líquid. Es descriu tot seguit aquest terme de la viscositat.

### 2.4.2. La viscositat

Considerant un fluid contingut entre dues grans làmines planes i paral·leles d'àrea A, separades entre elles per una distància petita Y, suposem que el sistema està inicialment en repòs, però al cap d'un temps  $t=0$ , la làmina inferior es posa en moviment en la direcció de l'eix x, amb una velocitat constant V. A mesura que passa el temps el fluid guanya quantitat de moviment, i, finalment s'estableix el perfil de velocitat en règim estacionari que s'indica en la figura 2.4.1. Arribat a aquest estat estacionari de moviment, s'ha d'aplicar una força constant F per conservar el moviment de la làmina inferior. Aquesta força ve donada per la següent expressió (suposant que el flux és laminar):

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y} \quad (\text{eq. 2.4.1})$$

És a dir, que la força per unitat d'àrea és proporcional a la disminució de velocitat amb la distància Y (Bird et al., 1978). La constant de proporcionalitat  $\mu$  s'anomena viscositat del fluid.



**Figura 2.4.1:** Perfil de velocitat en estat estacionari per un fluid contingut entre dues làmines.

Per a la posterior utilització de l'equació 2.4.1 és convenient expressar-la en una forma més explícita. L'esforç de cisalla que s'exerceix en la direcció  $x$  sobre la superfície del fluid, situada a una distància constant  $y$ , pel fluid existent en la regió on  $y$  és menor, es designa per  $\tau_{yx}$ , i la component  $x$  del vector de velocitat del fluid, per  $v_x$ . Cal tenir en compte que  $v_x$  no és igual a  $\delta v/\delta x$ . D'acord amb aquests símbols, l'equació 2.4.1 queda de la següent forma

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (\text{eq. 2.4.2})$$

És a dir, que la força de cisalla per unitat d'àrea és proporcional al gradient negatiu de la velocitat local. Aquesta és la llei de Newton de la viscositat, i els fluids que la compleixen s'anomenen fluids newtonians. Tots els gasos i la major part dels líquids senzills la compleixen. Els fluids que no segueixen aquesta llei (essencialment pastes, suspensions i polímers d'elevat pes molecular) s'anomenen fluids no-newtonians.

També resulta convenient interpretar l'equació 2.4.2 d'aquesta manera. En les immediacions de la superfície que es mou, on  $y=0$ , el fluid adquireix una determinada quantitat de moviment en la direcció de l'eix  $x$ . Aquest fluid comunica alhora part de la seva quantitat de moviment a la capa adjacent de líquid, fent que es mantingui en moviment en la direcció  $x$ . Per tant, té lloc una transmissió de quantitat de moviment  $x$  a través del fluid en la direcció  $y$ , i per tant,  $\tau_{xy}$  es pot interpretar també com la densitat de flux viscos de quantitat de moviment  $x$  en la direcció  $y$ . Aquesta interpretació està en relació amb la naturalesa dels processos de transport de quantitat de moviment.

D'acord amb l'equació 2.4.2 es dedueix que la densitat de flux viscos de quantitat de moviment segueix la direcció del gradient de velocitat, és a dir, que va disminuint de la

zona de velocitat alta cap a la zona de velocitat baixa (com el calor va d'una zona calenta a una de freda). El gradient de velocitat es pot considerar com una força impulsora del transport de la quantitat de moviment.

En referir-se a la llei de Newton, es pot fer en termes de forces, posant de manifest la naturalesa essencialment mecànica d'aquest fenomen, o en termes de transport de quantitat de moviment, fent palès les analogies amb el transport de matèria i energia.

Les unitats de  $\tau_{xy}$  són  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ , que s'anomenen Pascals (Pa), i les de  $\mu$  Pa·s.

Es pot dir també que la viscositat  $\mu$  és la relació entre la tensió de cisallament i el gradient de velocitat:

$$\mu = \frac{\tau(\text{Pa})}{dv/dy(\text{s}^{-1})} \quad (\text{eq. 2.4.3})$$

Aquesta llei només és vàlida si el flux és laminar, és a dir, si les capes de fluid llisquen unes sobre les altres.

Pels fluids anomenats no-newtonians, la llei descrita per l'equació anterior defineix el paràmetre  $\mu_a$  com la viscositat aparent.

### 2.4.2.1. Energia necessària per fluir

Per a mantenir en moviment el fluid, ja sigui newtonià o no-newtonià, com ara una suspensió de fibres, es necessita aportació d'energia. Aquesta es consumeix en el fregament entre molècules del fluid o de les fibres en suspensió, i en vèncer les forces intermoleculars o entre les partícules en suspensió. La potència dissipada en aquest moviment s'expressa com:

$$dP = dF_y \cdot dv_y \quad (\text{eq. 2.4.4})$$

Amb l'ajuda de la definició de la llei de Newton com s'ha exposat i la definició del gradient de velocitat, se'n deriva que:

$$dP = \tau \cdot \frac{dv}{dy} \cdot (dx \cdot dy \cdot dz) \quad (\text{eq. 2.4.5})$$

d'on:

$$\varepsilon = \frac{dP}{dx \cdot dy \cdot dz} = \mu \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 = \frac{\tau^2}{\mu} \quad (\text{eq. 2.4.6})$$

$\varepsilon$  representa l'energia dissipada per unitat de temps i de volum. El seu augment, lligat al quadrat de la taxa de cisallament, pot implicar forts augments de la temperatura en el sí del fluid amb la seva posada en moviment.

#### 2.4.2.2. Principals paràmetres que influencien la viscositat d'un fluid

La viscositat d'un fluid depèn dels següents paràmetres:

- Temperatura. La viscositat disminueix quan la temperatura augmenta.
- Naturalesa química del fluid.
- Concentració en dissolució.
- Pressió. La viscositat dels líquids disminueix lleugerament amb la pressió. Aquesta variació és normalment negligible.
- Temps
- Tensió de cisallament o gradient de velocitat pels fluids no-newtonians.

#### 2.4.3. Diferents comportaments reològics dels fluids

D'acord amb la llei de la viscositat de Newton, al representar gràficament  $\tau_{yx}$  en funció de  $(dv_x/dy)$  per un fluid determinat, s'ha d'obtenir una recta que passa per l'origen de coordenades, i amb un pendent igual a la viscositat  $\mu$  del fluid a una determinada temperatura. Els líquids homogenis no polimeritzats tenen aquest comportament, però hi ha materials importants des del punt de vista industrial que no tenen aquest comportament, i s'anomenen fluids no-newtonians. Les suspensions papereres en són un exemple.

L'estudi del comportament dels fluids no-newtonians s'anomena reologia, i el seu camp d'aplicació va des de la mecànica de fluids newtonians fins a l'elasticitat i deformació dels sòlids.

D'una manera generalitzada el comportament d'aquest tipus de fluids es pot dir que s'ajusta a la llei de Newton expressada d'una manera més general com:

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{dv_x}{dy} \quad (\text{eq.2.4.7})$$

en que com que  $\eta$  és variable, es pot expressar en funció de  $dv/dy$  o de  $\tau_{yx}$  indistintament. Si el fluid té un comportament en que  $\eta$  és constant i independent de  $dv_x/dy$ , llavors  $\eta = \mu$  i el fluid es comporta com a newtonià.

La representació  $\tau$  en funció de  $dv_x/dy$  s'anomena reograma, i permet classificar els diferents fluids segons els seus comportaments reològics (figura 2.4.2).

S'han proposat nombroses equacions empíriques o "models" per expressar la relació que existeix en estat estacionari entre  $\tau_{xy}$  i  $dv_x/dy$ .

Model de Bingham

$$\tau_{xy} = -\mu_0 \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 \quad \text{si } |\tau_{yx}| > \tau_0 \quad (\text{eq.2.4.8})$$

$$\text{i } \frac{dv_x}{dy} = 0 \quad \text{si } |\tau_{yx}| < \tau_0 \quad (\text{eq.2.4.9})$$

Com es veu en el model, es caracteritzen per una tensió llindar de cisallament  $\tau_0$  a partir de la que el fluid pot fluir. Aquest comportament s'observa sovint en fluids pastosos i són generalment deguts a una estructura tridimensional que es trenca per una tensió superior a la tensió llindar  $\tau_0$ .

La viscositat aparent s'anomena en aquest cas viscositat plàstica.

## Model de Ostwald

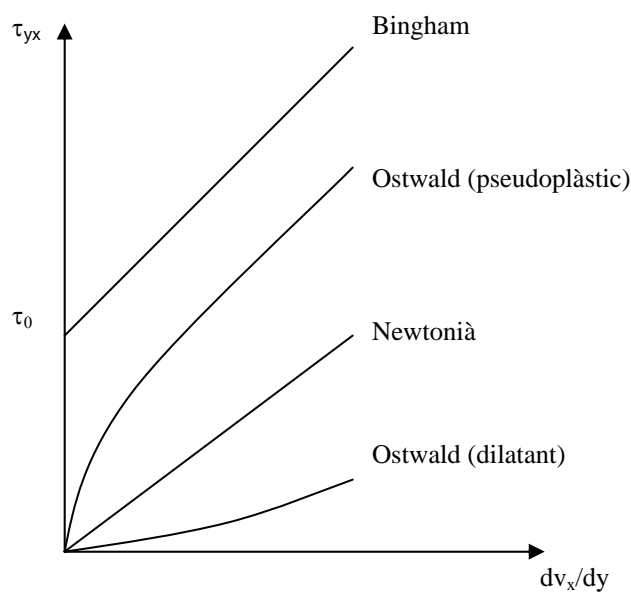
$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad (\text{eq.2.4.10})$$

Equació que es coneix amb el nom de llei de la potència. Com es pot veure, quan  $n$  és igual a 1 es converteix en la llei de la viscositat de Newton, amb  $m=\mu$ . El valor de  $n$  és un índex de la desviació del comportament newtonià, i es poden donar dos tipus de desviacions, que són les de  $n$  superior i inferior a la unitat, respectivament.

Quan el valor és inferior a la unitat, s'anomenen fluids reofluidificants o pseudoplàstics. Es caracteritzen per una viscositat aparent que decreix uniformement quan la taxa de cisallament ( $dv_x/dy$ ) augmenta, fins a arribar a un valor constant, aquest comportament s'explica per la tendència de les partícules del fluid a orientar-se amb l'augment de la velocitat. Les suspensions de partícules anisodiamètriques sovint tenen aquest comportament.

Quan el valor és superior a la unitat, s'anomenen fluids reoespessidors o dilatants, i es caracteritzen per una viscositat aparent creixent amb la taxa de cisallament.

Aquest comportament es pot observar en suspensions concentrades de partícules carregades.



**Figura 2.4.2:** Models de comportament reològic de fluids newtonians i no-newtonians.

Alguns fluids presenten un comportament depenent del temps. El comportament d'aquests fluids s'observa quan es traça el seu reograma a  $dv_x/dy$  creixent i després decreixent (figura 2.4.3): els valors del reograma, en viscositat aparent o de tensió llindar no són idèntiques en els dos casos. La corba presenta una histèresi, i es poden donar dos casos: fluids tixotròpics i fluids reopèxics.

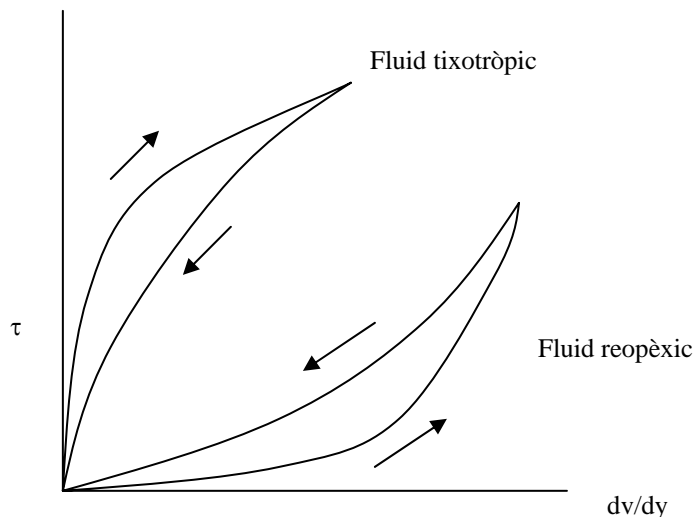


Figura 2.4.3: Reograma dels fluids amb comportament reològic que depèn del temps.

### 2.4.4. Propietats dels fluids, que afecten la seva viscositat

Un gran nombre de paràmetres poden influir en la viscositat de les suspensions fibroses, que es troben en la fase dispersada, en la fase contínua o en els tensioactius. S'anomena fase dispersada al conjunt de fibres i flòculs, i els factors que influeixen en els propietats reològiques són:

- La concentració volúmica, o sigui el volum que ocupa la fibra respecte el volum total de suspensió. Aquesta té influència sobre les interaccions hidrodinàmiques entre partícules. Quan augmenta la concentració volúmica, augmenta la formació d'agregats, i es produeix floculació.
- La viscositat de la fase dispersada: les partícules sòlides són de viscositat important, no es deformen sota la força aplicada o quan estan agrupades en forma floculada. Es deformen els ponts d'hidrogen que uneixen les fibres.

- La mida de les partícules, distribució de la mida i forma de les partícules: les propietats varien segons el diàmetre de partícula. Partícules més grans o més petites, la forma que tenen, superfície més o menys rugosa.
- La composició química influeix en les forces d'interacció entre partícules.

La fase contínua és l'aigua que hi ha entre les fibres i els flocs. Els factors que influeixen en les propietats reològiques són:

- La viscositat de la fase contínua: la viscositat de l'aigua és inferior a la viscositat de la suspensió, però és directament proporcional a la viscositat de la suspensió. És important l'augment de la viscositat en relació al dissolvent.
- La composició química, polaritat i pH influeixen la viscositat a través dels efectes sobre l'energia potencial d'interacció entre partícules.
- La concentració en electròlits (si el medi és polar) influeix la càrrega superficial de les partícules, i per tant influeix la viscositat; pot influenciar també la solubilitat dels tensioactius en la fase contínua

Els tensioactius utilitzats en el destintatge tenen influència en les propietats reològiques:

- La composició química influeix la solubilitat en la fase contínua i l'adsorció en la interfase sòlida- líquida.
- La concentració influeix la viscositat a través dels efectes sobre la viscositat de la fase contínua.
- El film adsorbit en la superfície, el seu espessor influeix les dimensions de les partícules i per tant la viscositat. Influeix també les interaccions entre partícules.
- Els efectes electroviscosos: quan les partícules són molt petites, la viscositat pot augmentar per efectes primaris i secundaris. El fet de portar una càrrega electrostàtica modifica els potencials d'interacció i la mobilitat de partícules. Se'n



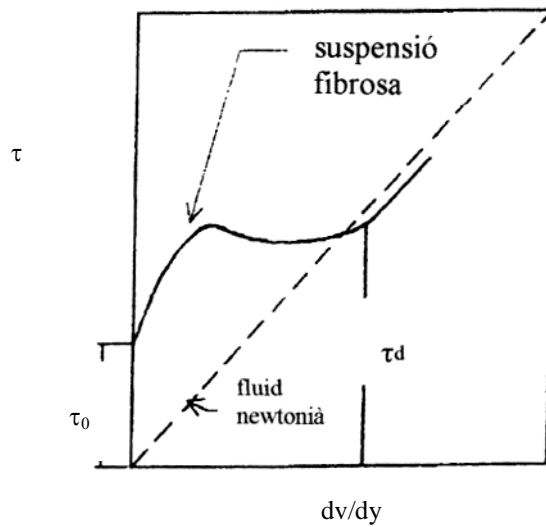
deriva un augment de la viscositat en relació a les partícules neutres anomenat efecte electroviscós.

### 2.4.4.1. Comportament reològic de les suspensions fibroses de baixa consistència.

El comportament reològic de les suspensions fibroses depèn alhora de les propietats individuals de les fibres i de la viscoelasticitat de la xarxa fibrosa que formen. Aquesta xarxa és porosa i compressible. Es pot dissociar en fibres individuals quan està exposada a forces de cisalla suficients. La forma del reograma de suspensions fibroses de baixa concentració (figura 2.4.4) mostra que el seu comportament és complex. Segons les variables estudiades, particularment la concentració i el gradient de velocitat, la suspensió fibrosa pot tenir diferents comportaments:

- la posada en moviment de la suspensió fibrosa necessita un cert esforç llindar  $\tau_0$  com en els *fluids de Bingham*.
- a taxes febles de cisallament, la suspensió fibrosa es pot descriure com un fluid reofluidificant o *pseudoplàstic*.
- per les taxes de cisallament elevades, el reograma de la suspensió fibrosa és el d'un *fluid newtonià*. (per sobre de  $\tau_d$ )
- es pot observar també un caràcter *tixotròpic* (Vietreicher et al, 1994).

Cal notar d'ara en endavant que la tensió de cisallament i la taxa de cisallament són respectivament proporcionals a la pèrdua de càrrega i a la velocitat del fluid en el conducte.

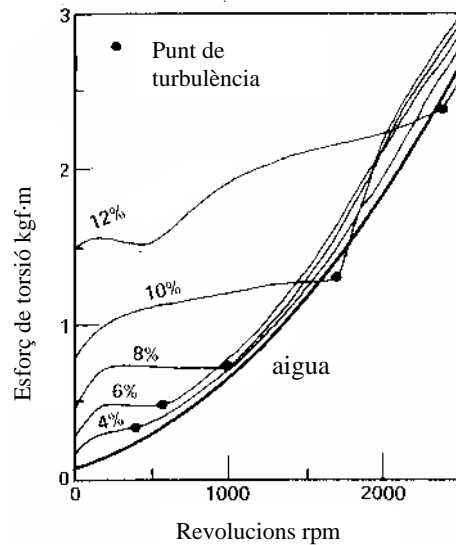


**Figura 2.4.4:** Reograma de les suspensions fibroses a concentració mitjana. Gullischen et al. (1981)

#### 2.4.4.2. Efecte de la fracció màssica en el comportament reològic de les suspensions fibroses.

L'agitació a diferents velocitats de rotació de les suspensions de pasta a diferents consistències, posa en evidència el diferent comportament de les fibres en la desintegració segons la distància entre fibres. Les interaccions superficials entre fibres tenen una important funció que afecta al comportament reològic de la suspensió.

En la figura 2.4.5 es pot observar que a mesura que augmenta la consistència és més gran el valor de  $\tau_0$ , el que vol dir que existeix una estructura tridimensional formada per les fibres en suspensió i les forces d'interacció entre elles. Com més gran és la fracció màssica, cal més energia per iniciar l'agitació, amb la deformació i el trencament (al menys parcial) d'aquesta estructura.



**Figura 2.4.5:** Reograma de pasta a diferents % de consistència, amb diferents valors de  $\tau_0$  (Gullischen et al. 1981)

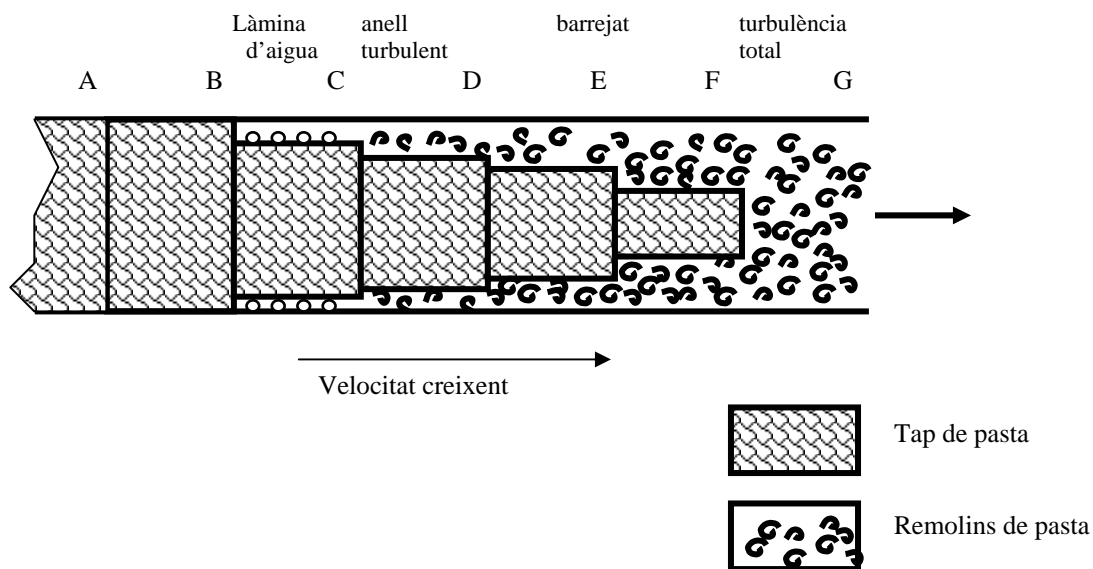
Una vegada en moviment la suspensió, el seu comportament s'acosta al d'un fluid de Bingham, fins a arribar a una determinada velocitat diferent per a cada fracció massica en que el comportament de la suspensió s'acosta al de l'aigua, sens dubte perquè l'estructura està totalment destruïda i les forces d'atracció entre fibres són completament menyspreables. La velocitat necessària per arribar a aquesta situació és creixent amb la fracció massica.

El flux de les suspensions fibroses és diferent al dels altres sistemes dispersos (suspensió líquid/sòlid) i d'altres líquids convencionals (newtonians o no). En un conducte, la suspensió pren la forma d'un tap i ocupa totalment el volum com un quasi sòlid. La taxa de cisallament necessària per a la posada en moviment i la destrucció del tap de pasta augmenta amb la concentració per arribar als valors més elevats a concentracions massiques compreses entre el 8 i el 16%.

Els diferents tipus de flux en una conducció es poden veure en la figura 2.4.6 (Gullischen i Härkönen, 1981)

- zona AB: el tap de pasta comença a desplaçar-se com un pistó en el sí de la conducció per les baixes velocitats. Predominen els fregaments sòlid/líquid, i apareix un film d'aigua molt prim.

- zona BC: sota l'acció del cisallament, algunes fibres i flòculs se separen del tap de pasta cap al film d'aigua. Es desplacen entre el tap de pasta i la paret de la conducció actuant com rodaments que arrosseguen la xarxa fibrosa.
- zona CE: la disminució de la corba de fricció indica un nou canvi de règim de flux. Es forma un anell líquid continu entre el tap de pasta i la paret (zona CD). El seu flux està considerat com a laminar en la literatura, tot i que les irregularitats de la superfície de la xarxa fibrosa pertorben les línies de corrent en aquesta zona. Un nou creixement indicaria el punt on el flux del film d'aigua seria turbulent (zona DE). La xarxa fibrosa té encara un flux de pistó.
- zona EF: un augment de la velocitat intensifica la turbulència. El tap de pasta es redueix en dimensions i els floccs separats es barregen en el règim turbulent de l'anell d'aigua.
- zona FG: règim turbulent en què el tap de pasta està completament destruït. La suspensió fibrosa és en règim de turbulència newtoniana. En la literatura està considerat com "la fluidització".



**Figura 2.4.6:** Il·lustració del flux de suspensions fibroses a través d'un conducte (Gullischen et al., 1981; Waller, 1985).

Les concentracions màssiques màximes amb les quals s'ha pogut treballar han estat de fins el 15% (Gullischen et al., 1981; Duffy et al., 1978).

### 2.4.5. Floculació i forces que lliguen la xarxa fibrosa

Com s'acaba de veure, l'addició d'una petita quantitat de fibres en l'aigua canvia les propietats hidrodinàmiques de manera considerable. A més, la presència de la xarxa fibrosa complica els fenòmens en joc:

- no hi ha homogeneïtat
- hi ha flòculs formats per fibres embolicades
- hi ha barreja a la suspensió
- suporta cisallament
- és compressible

L'estructura de la xarxa fibrosa és un paràmetre important. És necessari conèixer els mecanismes i les forces cohesives que intervenen.

a) *Contactes entre fibres (Kerekes et al., 1985, 1995, 1996)*

A concentracions baixes (inferiors a 0.1 %), la majoria de les fibres en la suspensió no estan en contacte continu entre elles. Per formar flocs localment, les fibres han d'entrar en col·lisió entre elles i quedar unides. Hi ha col·lisions quan les fibres són prou nombroses i quan hi ha una diferència relativa de velocitats entre elles. Gràcies a la gran llargada respecte el seu diàmetre, les fibres estan alhora en rotació i en traslació.

Si considerem les fibres com bastons rígids de llargada  $l$  i diàmetre  $d$ , segons Mason (1954), una fibra és estadísticament independent en el seu volum esfèric ocupat quan la seva concentració volúmica  $C_v$  és inferior a:

$$C_v = \frac{3}{2}r^{-2} \quad \text{on } r = l/d \quad \text{(eq. 2.4.11)}$$

Exemple d'aplicació: si suposem  $l = 3 \text{ mm}$  i  $d = 30 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$

i per la concentració màssica  $C_m = 0.023\%$

s'obté per la concentració volúmica  $C_v = 1.5 \cdot 10^{-4}$

Aquests valors corresponen a concentracions molt baixes. Fins i tot amb procediments clàssics a concentracions baixes, aquest valor és àmpliament sobrepassat, per tant les fibres estan sempre associades entre elles.

Kerekes ha estès aquest concepte i ha definit  $n_f$  com el nombre de fibres compreses en un volum esfèric ocupat per una fibra,

$$n_f = \frac{2}{3} \cdot C_v \cdot r^2 \approx 5 \cdot C_m \cdot \frac{l^2}{w} \quad \text{on } w \text{ representa la massa lineal} \quad (\text{eq. 2.4.12})$$

Aquest factor d'ocupació indica el nivell de contacte entre fibres: com més elevat sigui, les fibres tindran més possibilitats d'estar unides.

Els contactes interfibril·lars es poden classificar en tres règims, dependents de la concentració: col·lisions ocasionals, col·lisions forçades i contactes continus.

El límit entre els dos primers règims correspon aproximadament a la concentració crítica definida per Mason el 1954, que correspon a un factor d'ocupació de 1.

El límit entre el règim de col·lisions forçades i de contactes continus apareix aproximadament quan hi ha tres contactes per fibra. És la concentració de sedimentació segons Thalen et al. (1964) que correspon a un factor d'ocupació de 60. Quan el factor d'ocupació és superior a 60, les fibres en la suspensió formen una xarxa contínua en perpetu reordenament, fins i tot en el cas de flux.

La formació de flòculs necessita d'un cert nombre de contactes entre fibres, però no és una condició suficient, la intensitat de les forces hi tenen també un paper important.

*b) Forces que actuen sobre les fibres. (Kerekes et al., 1985)*

En els punts de contacte entre les fibres poden existir quatre tipus de forces cohesives, que són les responsables de la resistència mecànica de flòculs.

- Forces col·loïdals: són forces electrostàtiques i electrocinètiques que actuen entre partícules petites. Depenen fortament del contacte entre fibres, que és difícil per la rugositat i les càrregues elèctriques en la seva superfície.

- Forces mecàniques de superfície: són forces d'entrellaçat que apareixen per concentracions suficientment elevades originades pel contacte entre fibres. Depenen de la fibril·lació, de l'inflament i del corbat de les fibres.
- Doblegat elàstic de les fibres: són forces cohesives entre fibres causades per la resistència en fricció produïda per les forces normals en els punts de contacte. Depenen molt del nombre de contactes per fibra, del coeficient de fricció entre fibres, de la flexibilitat de les fibres i de la taxa de cisallament aplicada a la xarxa fibrosa.
- Tensió (o força) de superfície: són les forces de cohesió generades per les tensions interfacials en presència de gas.

Aquests 4 tipus de forces: col·loïdals, mecàniques de superfície, doblgat elàstic de fibres i de tensió de superfície, depenen fortament de les característiques geomètriques de les fibres, que fan que cada una de les forces pugui actuar amb major o menor extensió, condicionant el resultat final.

El comportament de cada fibra depèn essencialment de les seves característiques, però també de les característiques i posició de les altres fibres i partícules sòlides properes dins de la suspensió.

Entre els condicionants més importants del comportament d'aquestes fibres, considerades com a partícules en suspensió, cal considerar les dimensions i forma de la fibra, la seva estructura superficial, la rigidesa de la fibra, i també, com s'ha dit, les característiques i la distància a les altres partícules veïnes amb les quals podrà interaccionar.

Les dimensions petites de la partícula afavoreixen el seu comportament col·loïdal, amb forces electrostàtiques febles entre partícules amb elevada superfície específica, mentre que en les fibres de dimensions més grans, i principalment de forma allargada, prendran importància els entrellaçats entre fibres mantinguts per les característiques superficials com la rugositat i grau de fibril·lació, que impediran el lliscament d'unes fibres sobre les altres.

Els factors preponderants sobre les forces de cohesió són la concentració i la velocitat de cisallament:

- el nombre de contacte entre fibres creix amb la concentració.
- la velocitat de cisallament tendeix a destruir la xarxa formada.

A concentració mitjana, predominen les forces degudes al doblegat de fibres, a les quals es poden afegir les forces degudes a les tensions interfacials en presència d'aire.

*c) Complicació amb la concentració mitjana*

A més del gran contacte entre fibres degut a una gran concentració en fibres, la presència d'aire en aquestes suspensions porta complicacions. L'aire és sempre una font de problemes, no només perquè canvia la viscositat de la suspensió (fenomen conegut pel consum d'energia en l'etapa de refinament), sinó també perquè es pot acumular darrera qualsevol defecte a nivell de les canonades (Thomson, 1986).

Les interfases aire-aigua-fibres que es produeixen en els intersticis de les fibres produeixen cohesions fortes tipus tensió superficial que s'uneixen a les forces degudes al doblegat elàstic de les fibres (Kerekes et al., 1985). La quantitat d'aire retingut augmenta la concentració (figura 2.4.7). Per sota del 10%, l'aire contingut en la suspensió augmenta de manera relativament feble. A partir del 10%, s'observa un augment més important i més ràpid. Això s'acompanya d'una aparença de buit en la pasta (Dosch et al., 1986). Així, si s'afegeix aigua a una suspensió del 15% de consistència, no augmentarà el volum fins que la concentració arribi al 10% segons Thomson (1986).

La concentració màssica  $C_m$  no és una mesura de la concentració en fibres per les concentracions altes: la fracció de volum d'aire anomenada  $\phi_g$  també la determina. En efecte, els valors de  $\phi_g$  poden variar considerablement (a  $C_m=19\%$ ,  $\phi$  pot variar de 6 a 35%). Quan  $\phi_g$  augmenta, la naturalesa de la floculació canvia per passar de ser una concentració en massa de fibres en l'aigua, a agregats aigua/fibres envoltats d'aire. Llavors la suspensió deixa de ser una xarxa contínua segons Kerekes et al. (1985).



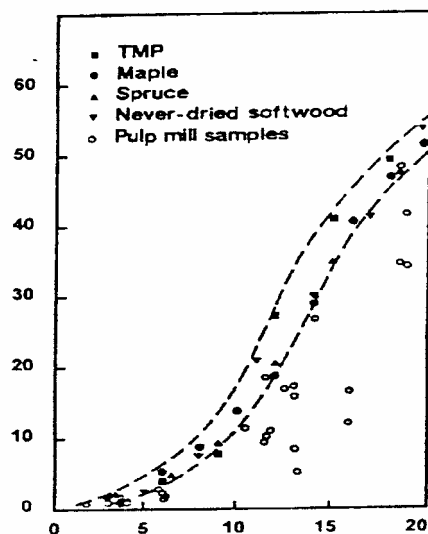


Figura 2.4.7: Quantitat d'aire en funció de la consistència (Dosch et al., 1986)

D'aquest apartat es pot concloure que les suspensions fibroses són xarxes contínues que posseeixen una estructura i una resistència originada per les interaccions entre fibres veïnes. Quan la concentració augmenta, el nombre de interaccions entre fibres creix i contribueix així a augmentar la resistència de la xarxa fibrosa. Cal remarcar que els flocs, a més de ser una regió de més alta concentració màssica, és també una regió més resistent que el medi que els envolta (a causa del major nombre de contactes entre fibres). Els flocs es poden considerar com a entitats independents dins la suspensió que flueix.

A concentració mitjana (8 a 20%), la resistència i la no uniformitat de la xarxa fibrosa s'accentuen. El major nombre de contactes entre fibres augmenta considerablement la resistència de la xarxa i dels flòculs. La presència d'una fase gasosa crea forces de tipus interfacials entre les fibres, augmentant encara més aquesta resistència. En les zones properes a les més altes concentracions, el caràcter de la suspensió canvia d'una determinada concentració en massa de fibres en l'aigua a agregats de fibres molls i envoltats d'aire. Aquest sistema trifàsic heterogeni es pot considerar com un sistema porós (Bennington et al., 1998a).

A alta concentració (més enllà de 20%), la quantitat d'aire és important i el sistema es pot considerar com un medi permeable.

## 2.5. Caracterització de les suspensions fibroses

Els diferents estudis que es poden trobar en la bibliografia caracteritzen les suspensions fibroses amb l'ajuda de la força de cisalla ( $\tau_d$ ), l'energia o la velocitat necessària per la fluidització i la viscositat aparent, conceptes que es descriuen tot seguit.

### 2.5.1. Força de cisallament

Les suspensions fibroses es poden caracteritzar per la força llindar ( $\tau_y$ ) necessària per començar el moviment de la suspensió en règim pistó. També es poden caracteritzar per la força de cisallament ( $\tau_d$ ) suficient per trencar la xarxa fibrosa. Aquesta resistència depèn fortament de la concentració, tal com ha resumit Kerekes et al. (1985):

$$\tau_d = a \cdot C_m^b \quad \left\{ \begin{array}{l} \tau_d \text{ és la tensió de ruptura (Pa)} \\ C_m \text{ és la concentració massica} \\ a \text{ i } b \text{ són constants} \end{array} \right. \quad (\text{eq. 2.5.1})$$

Els valors de les constants  $a$  i  $b$  varien respectivament de 1.18 a 24.5 i de 1.25 a 3.02 per baixes concentracions segons els autors. Aquestes diferències provenen dels diferents mètodes utilitzats, dels baixos valors de concentració estudiats i del tipus de pasta.

La transició d'un flux lliscant uniforme a una barreja completa amb un viscosímetre rotatiu utilitzat inicialment per Gullischen i Härkönen (1981) seria similar al començament de la reducció de mida del tap de pasta en els conductes. Aquesta semblança explicaria la continuïtat de la corba de  $\tau_d$  en funció de  $C_m$  pels dos tipus de mesures.

Bennington et al. (1998) efectuen mesures de  $\tau_d$  per concentracions entre 0.4 i 33% i troben que:

$$\tau_d = 8.36 \cdot C_m^{2.79} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{pasta Kraft blanquejada} \\ \text{amb } C_m \text{ fins al 20\%} \\ \text{poca quantitat d'aire} \\ \text{viscosímetre rotatiu} \end{array} \right. \quad (\text{eq. 2.5.2})$$

Més recentment s’han obtingut mesures per concentracions de 20 a 50% amb elevat contingut en aire (Bennington et al., 1996). S’ha pogut establir una expressió general per pastes mecàniques i químiques:

$$\tau_d = 0.3 \cdot C_m^{3.2} (1 - \varphi_g)^{3.4} r^{0.6} \quad \text{amb} \quad \begin{cases} C_m \text{ entre 4 i 50\%} \\ \varphi_g \text{ contingut en aire entre 0 i 0.9} \\ r \text{ relació llargada a diàmetre de fibra} \end{cases} \quad (\text{eq. 2.5.3})$$

Aquesta expressió es pot simplificar utilitzant la concentració volúmica  $C_v$ :

$$\tau_d = 0.5 \cdot C_v^{3.1} \quad \text{amb } C_v \text{ entre 6 i 21} \quad (\text{eq. 2.5.4})$$

## 2.5.2. Potència necessària per a la “fluidització”

En el cas del flux laminar d’un fluid, és possible calcular l’energia dissipada  $\varepsilon$  per unitat de volum:  $\varepsilon = \tau^2 / \mu$ . És el que fa Wahren (1979) prenent com a punt de referència la turbulència totalment desenvolupada (punt G de la figura 2.4.6). Altres autors (Gullischen i Härkönen, 1981; Bennington i Kerekes, 1996) han utilitzat el punt de transició del començament de la barreja (punt E), obtenint l’expressió:

$$\varepsilon \text{ (en W/m}^3\text{)} = a \cdot C_m^b \quad (\text{eq. 2.5.5})$$

Es poden veure les constants a i b, segons els diferents autors, en la taula II.5.1.

**Taula II.5.1:** Valors de les constants a i b per calcular  $\varepsilon$  (eq. 2.5.5), segons diferents autors

a	b	
$1.2 \cdot 10^4$	5.3	segons Wahren (1980)
$3.4 \cdot 10^2$	3.4	segons Gullischen i Härkönen (1981)
$4.5 \cdot 10^4$	2.5	segons Bennington i Kerekes (1996)
$7.7 \cdot 10^3$	2.2	segons Wahren modificat per Bennington i Kerekes (1996)

### 2.5.3. Velocitat mínima per arribar a la fluidització

Thieule (1999) representant la potència consumida en funció de la velocitat de rotació d'un reactor Quantum agitant pasta de paper a mitjana concentració (8 a 15%), observa que en augmentar la velocitat d'agitació, existeix un punt a partir del qual la suspensió esdevé tan fluida com l'aigua, anomenat punt de fluidització. Aquest punt es caracteritza en el gràfic per un canvi en el pendent (figura 2.5.1). Aquesta velocitat de fluidització  $v_f$  es pot prendre com a referència per comparació amb altres suspensions. Per concentracions màssiques fins al 12%, s'ha pogut observar que:

- $v_f$  és lineal amb  $C_m$
- $v_f$  es pot determinar amb molta precisió.
- $v_f$  augmenta amb la quantitat de càrregues minerals
- $v_f$  augmenta amb la llargada de les fibres

En el mateix estudi s'ha observat també que la suspensió paperera presenta un comportament tixotròpic, és a dir, que dóna una corba d'histèresi en que per agitar la suspensió a una determinada velocitat cal més potència si es parteix del repòs, que si la suspensió ha estat recentment agitada a una velocitat més elevada.

La relació entre la potència necessària per a l'agitació de la suspensió i la necessària per agitar aigua es va fent més propera a la unitat a mesura que augmenta la velocitat d'agitació.

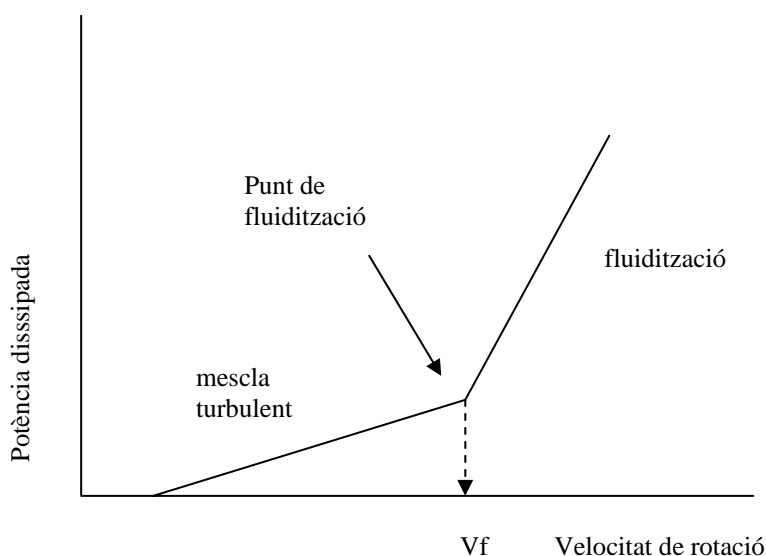


Figura 2.5.1: Caracterització de la velocitat de fluidització (Thieule, 1999).

## 2.5.4. Descripció de la suspensió fibrosa per viscositat

Com ja hem vist, el comportament de suspensions fibroses és molt complexa (Blanco et al., 1993) posen en evidència un caràcter pseudoplàstic i viscoelàstic per suspensions fins al 3% de concentració. Per una concentració màssica de 1.5% Radoslavova et al., (1996) han vist el caràcter reofluidificant en una pila Valley.

Sempre a baixa concentració s'ha observat que la viscositat aparent disminueix quan:

- La concentració disminueix (Chase et al., 1989; Radoslavova et al., 1996)
- La temperatura augmenta (Savolainen et al., 1991)
- La relació llargada a diàmetre de les fibres disminueix (Radoslavova et al., 1993)

En canvi, pocs autors s'han interessat per concentracions mitjanes en termes de viscositat per la dificultat de les determinacions. A continuació, en la figura 2.5.2., es mostren els resultats de viscositat aparent determinada en la fluidització:

- Bennington i Kerekes (1996):

A partir de l'equació 2.4.1 han establert la relació següent, de la potència dissipada en règim laminar en funció de la tensió i de la viscositat (amb  $\varepsilon_f$  i  $\tau$  determinades experimentalment):

$$\mu_a = 1.5 \cdot 10^{-3} C_m^{3.1} \quad \text{per } C_m \text{ entre 1 i 12\%} \quad (\text{eq. 2.5.5})$$

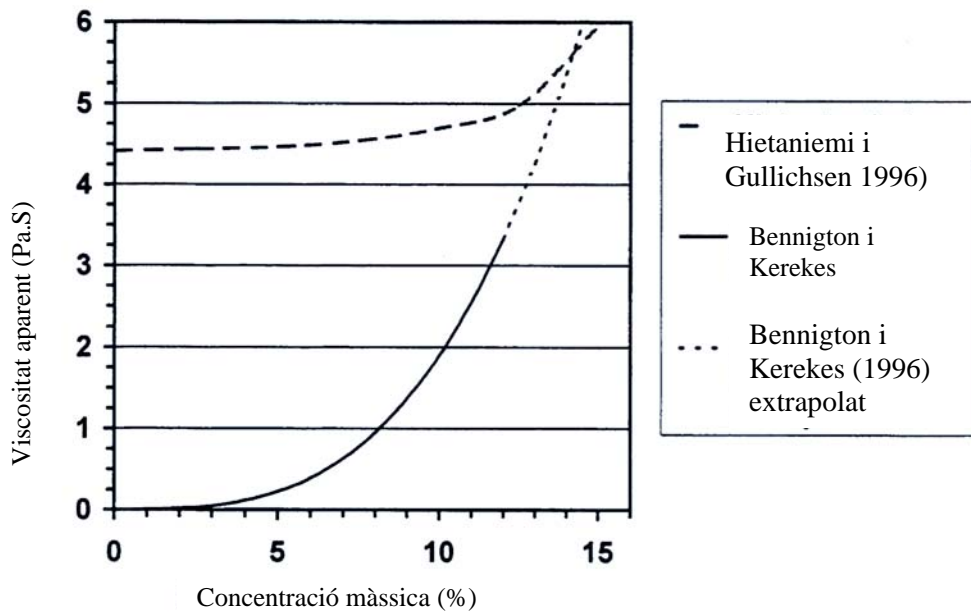
- Bennington (1998):

$$\mu_a = 2.33 \cdot 10^{-2} C_m^{3.1} \quad \text{per } C_m \text{ entre 1 i 12\%} \quad (\text{eq. 2.5.6})$$

En aquesta expressió la viscositat aparent  $\mu_a$  s'ha avaluat considerant un règim turbulent isotròpic que verifica  $\varepsilon = 15\mu(dv/dy)^2$

- Hietaniemi i Gullichsen (1996):

Suposen que la potència dissipada per unitat de volum es pot expressar com  $\varepsilon = \tau_{mitjana}^2 / 2\mu_a$  descriu una força mitjana aplicada a la suspensió.



**Figura 2.5.2:** Viscositat aparent en la fluidització, segons diferents autors.

D'aquest apartat es pot concloure que a baixa concentració, el comportament reològic de les suspensions fibroses és complex i ha pogut conduir a males interpretacions. Els estudis fets a mitjana concentració són escassos i tracten essencialment de la "fluidització" i l'aplicació en el blanqueig.

Només Bennington et al. (1998) han treballat amb púlpers utilitzats en el destintat. Els estudis a concentració mitjana només s'han interessat per la concentració en fibres i el tipus de fibres, mentre que existeixen un gran nombre de paràmetres que poden influir en el comportament reològic dels sistemes dispersos. Així, no coneixem cap estudi que mostri la influència del pH o de la temperatura a mitjana concentració, essent dos paràmetres molt importants en el procés de destintat.

## 2.6. Caracterització de la desintegració

L'objectiu del pulpejat o desintegració és obtenir una suspensió bombable, i això requereix passar d'un sistema heterogeni de paper i aigua a un sistema bifàsic aigua més fibres, més homogeni. Però aquesta suspensió més homogènia ja seria bombable abans que els paquets fibrosos esdevinguin fibres individualitzades. De manera que cal seguir les operacions d'agitació i barreja fins assolir un bon desfibrament dels paquets fibrosos.

En l'annex 2.1, hi ha una revisió bibliogràfica referent a l'evolució dels equips industrials i de laboratori.

Les operacions de barreja, agitació i desfibratge no es poden estudiar aïlladament quan es pulpegen papers vells ja que l'acció tèrmica (desintegració amb aigua calenta) i l'acció química (addició de reactius químics que faciliten el despreniment de tinta), conjuntament amb el temps d'aplicació de les operacions mecàniques també influeixen en el desfibratge (Vilaseca, 2000).

L'agitació consisteix en produir moviments turbulents en la suspensió mitjançant dispositius mecànics amb una geometria determinada. La força tallant que indueix l'agitació facilitarà la transferència de matèria i la transmissió de calor (McCabe et al., 1991). El consum d'energia en un procés d'agitació és funció de la geometria del sistema (dipòsit i rotor), de la velocitat i diàmetre del rotor, de les propietats físiques del líquid i de l'acceleració de la gravetat. L'anàlisi dimensional de l'operació d'agitació facilita la seva caracterització, on les interaccions que hi intervenen queden resumides per la correlació entre el número de potència i els nombres de defineixen el tipus de flux del sistema, que són el número de Reynolds i el número de Froude:

$$N_p = K \cdot Re^x \cdot Fr^y \quad (\text{eq. 2.6.1})$$

Aquesta expressió la va obtenir Roustan (1985), producte d'un anàlisi dimensional de la potència necessària per fer girar un rotor en presència d'un fluid newtonià, podent-la expressar com una funció de les propietats del fluid i de la geometria del conjunt mòbil-cuba d'agitació (s'explicarà en el desenvolupament d'aquest capítol).

Essent,  $N_p$  el numero de potència,  $Re$  el número de Reynolds i  $Fr$  el número de Froude que s'expressen com:

$$N_p = P / \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (\text{eq. 2.6.2})$$

$$Re = \rho \cdot n \cdot d^2 / \mu \quad (\text{eq. 2.6.3})$$

$$Fr = d \cdot n^2 / g \quad (\text{eq. 2.6.4})$$

i  $K$  és una constant característica del sistema. On,

$P$  : potència del rotor (kW)

$\rho$  : densitat de la suspensió ( $\text{kg/m}^3$ )

$n$  : velocitat de rotació (rev/s)

$d$  : diàmetre del rotor (m)

$\mu$  : viscositat de la suspensió (Pa·s)

$g$  . acceleració de la gravetat ( $\text{m/s}^2$ )

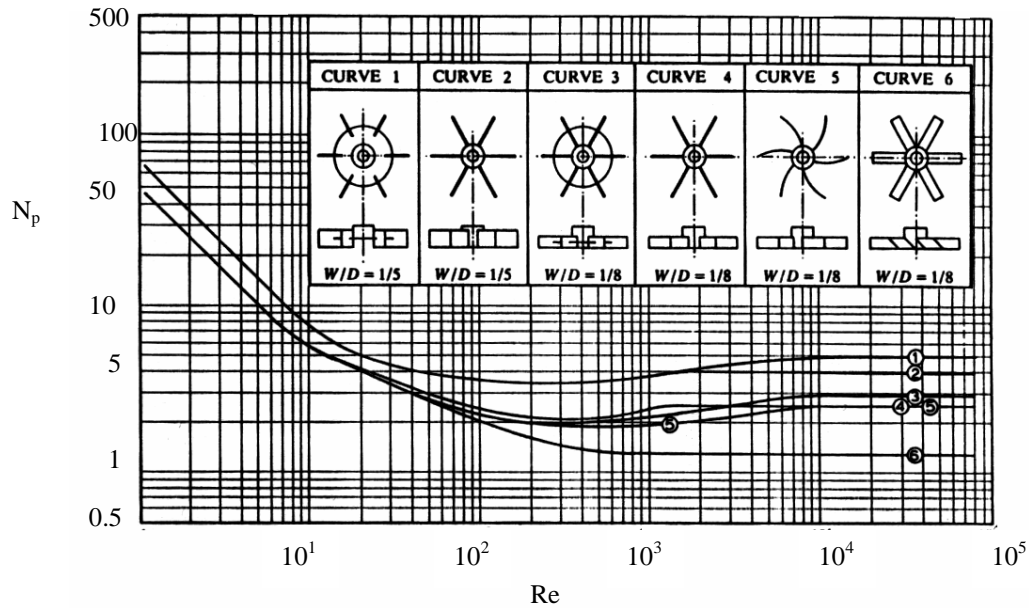
D'aquests paràmetres destaca la dificultat de la mesura de la viscositat (que s'explica al llarg d'aquest capítol).

El número de Reynolds representa la relació entre les forces inercials i les forces viscoses del fluid. El número de Froude és producte de la combinació entre les forces aplicades i l'acceleració de la gravetat. Sempre que hi ha un superfície lliure, la gravetat té una gran influència. Com més alt és el número de Froude, més influència té la gravetat. El número de potència quantifica la dificultat d'agitar el fluid, com més alt és  $N_p$ , més difícil és provocar agitació en el fluid.

El tipus de dependència que s'estableixi entre els números de potència i de Reynolds definirà el règim de flux dominant, que pot ser laminar, turbulent o de transició.

La figura 2.6.1, relaciona els números de potència i de Reynolds per a sis geometries de rodets concretes.





**Figura 2.6.1:**  $N_p$ - $Re$  per sis geometries de rodets diferents (Bates et al., 1960).

La barreja o dispersió és la segona operació que configura la desintegració i facilita la homogeneïtzació de la suspensió. En una suspensió sòlid-líquid, una bona mescla requereix l'existència de corrents intenses que arribin a tots els punts del sistema. Per tant, una barreja o dispersió eficaç depèn tant de l'agitació que es transmet com de la consistència. El fenomen de l'agitació s'assoleix en el moment que la consistència puntual s'iguali a la consistència mitjana del sistema. Es defineix la intensitat de segregació ( $I_s$ ) com la raó entre la mitjana dels quadrats de les consistències puntuals i el quadrat de la consistència mitjana:

$$I_s = \overline{C^2} / (\overline{C})^2 \tag{eq. 2.6.5}$$

D'altra banda, el número de mescla ( $N_m$ ), producte de la velocitat d'agitació ( $n$ ) i del temps d'aplicació ( $t$ ), relaciona la dependència de la barreja amb l'agitació del sistema:

$$N_m = n \cdot t \tag{eq. 2.6.6}$$

Segons Bennington (1998c), l'evolució de l'índex de Sommerville amb el temps respon a una llei cinètica de primer ordre, d'acord amb l'equació:

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{1}{\delta} F \quad (\text{eq. 2.6.7})$$

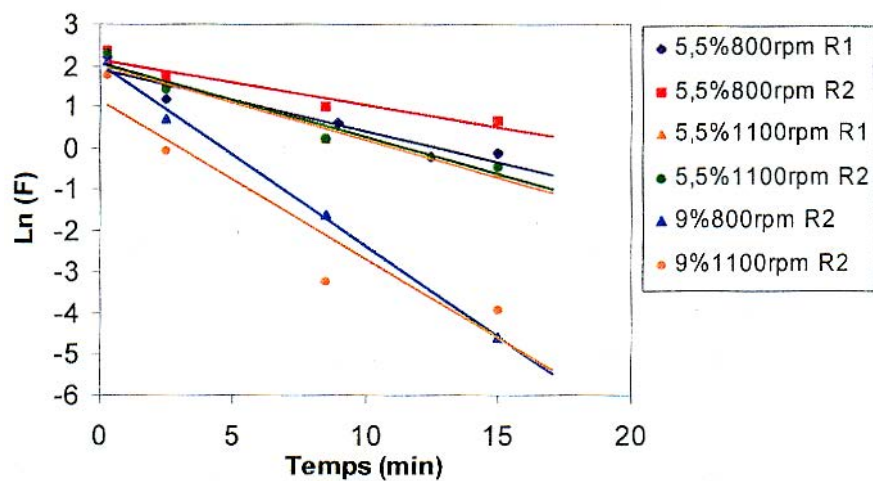
que si s'integra s'obté:

$$F = F_0 \cdot e^{-t/\delta} \quad (\text{eq. 2.6.8})$$

On  $F$  és el percentatge de grumolls (com a fibres no-individualitzades) a un temps determinat,  $F_0$ , el percentatge teòric de grumolls a temps zero i  $\delta$  una constant de temps que depèn de les condicions experimentals aplicades. Aquesta constant de temps, així com la taxa de grumolls inicials, es poden determinar a partir del pendent de la recta que s'obté si es representa el logaritme natural de la funció que expressa la taxa de grumolls en la suspensió:

$$\text{Ln}F = \text{Ln}F_0 - t/\delta \quad (\text{eq. 2.6.9})$$

L'estudi de la desintegració en pasta mecànica que proposen Mutjé et al. (1999) està d'acord amb l'equació establerta tal com mostra la figura 2.6.2, Vilaseca (2000).



**Figura 2.6.2:** Representació del logaritme natural aplicat al percentatge de grumolls en la desintegració de pasta mecànica.

## 2.7. Caracterització dels púlpers amb fluids newtonians

En l'apartat anterior s'ha pogut constatar que s'han fet pocs estudis sobre el comportament de la suspensió fibrosa durant la seva resuspensió, i particularment sobre les forces de fricció que intervenen. És molt important posar a punt un mètode de caracterització de les forces que intervenen en l'interior del púlper. Per això s'ha optat per una aproximació reològica d'un sistema complex, la pasta de paper. En efecte, aquesta aproximació es correspon a escala macroscòpica amb fenòmens que es produeixen a escala microscòpica o molecular i en particular a nivell estructural. Les suspensions fibroses no són pas un medi continu, presenten heterogeneïtats estructurals i són sensibles a la història soferta (tractament mecànic, químic,...) i són compressibles.

La caracterització dels púlpers, en tant que agitadors-barrejadors que s'ha posat a punt proposa efectuar mesures "in situ" durant el procés de desfibratge. L'estratègia adoptada integra alhora els coneixements i mètodes de l'enginyeria de processos i de reologia.

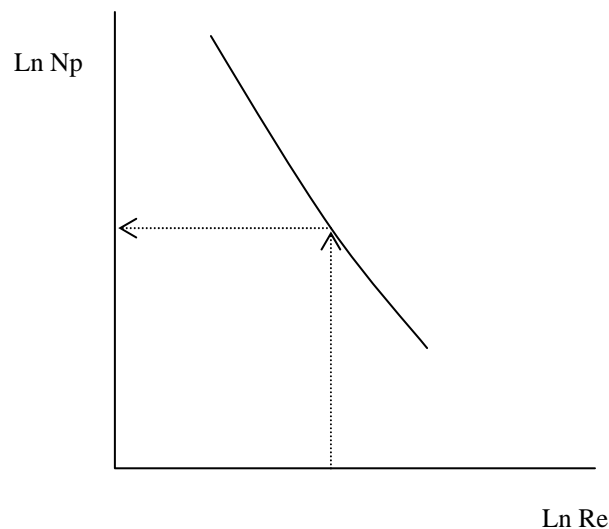
### 2.7.1. Mètode de Metzner i Otto

Per un fluid no-newtonià es pot definir una viscositat aparent  $\mu_a$  amb l'ajuda de l'equació:  $\mu_a = \tau / (dv/dy)$ . Aquest paràmetre es defineix per un esforç de cisallament donat i una velocitat de rotació del mòbil d'agitació. És necessari, doncs conèixer la força de cisallament associada per determinar-la. La mesura de la força és de tota manera difícil.

El mètode desenvolupat per Metzner i Otto (1957) no analitza pas la distribució de les forces de cisallament dins l'agitador, sinó que defineix una taxa mitjana de cisallament per la suspensió a estudiar. La viscositat aparent associada a aquesta taxa mitjana es defineix com la viscositat d'un fluid newtonià que tindria el mateix consum de potència per a mantenir l'agitació en les mateixes condicions. Aquest mètode és inicialment destinat a preveure la potència consumida per un agitador en presència d'un líquid homogeni en règim laminar.

Les etapes del mètode són:

1. Per un sistema cuba-mòbil d'agitació, es determina la corba característica amb l'ajuda de fluids newtonians per règims laminars. Després d'això, la característica del sistema en règim laminar té la forma  $N_p = K / Re^x$ .
2. Per un fluid no-newtonià, es mesura el nombre de potència  $N_{p \text{ fluid}}$  a una velocitat d'agitació amb el mateix sistema d'agitació.
3. El nombre de Reynolds generalitzat corresponent  $Re_{\text{fluid}}$  es determina a partir de la corba característica obtinguda amb ajuda de fluids newtonians en la primera etapa com mostra la figura 2.7.1.



**Figura 2.7.1:** Mètode de Metzner i Otto: corba logarítmica característica Np-Re.

4. La viscositat aparent  $\mu_a$  corresponent a la velocitat especificada es calcula a partir del nombre de Reynolds generalitzat definit per  $Re_{\text{fluid}} = \rho \cdot n \cdot d^2 / \mu_a$
5. A partir de la corba de flux (força de cisallament en funció de la taxa de cisallament) obtinguda amb l'ajuda d'un reòmetre, es determina la taxa de cisallament mitjana  $\dot{\gamma}_{\text{mitjana}}$ . El valor es determina a partir de la intersecció de la corba de flux del fluid no newtonià en qüestió i d'una recta que passa per l'origen i de pendent  $\mu_a$  que correspon a un fluid newtonià  $\dot{\gamma}_a$  és un valor mitjà de la taxa de

flux complexa en el sistema d'agitació i és lineal amb la velocitat de rotació del mòbil d'agitació:  $\gamma_{mitjà} = H \cdot n$ . La potència necessària per l'agitació d'un líquid pseudoplàstic a la velocitat  $n$  es pot estimar amb l'ajuda de l'equació  $\varepsilon = \tau^2 / \mu_a$  coneixent la viscositat aparent  $\mu_a$  avaluada amb l'ajuda del reograma, per una taxa de cisallament mitjana calculada a partir de  $\mu_{mitjana} = H \cdot n$ .

Aquest mètode s'ha utilitzat en el camp paperer per diferents autors, per caracteritzar un agitador (Bennington, 1988) i púlpers (Yackel, 1990; Bennington et al., 1998a).

### 2.7.2. Mètode de caracterització

D'acord amb Roustan (1985), la potència necessària per desplaçar un mòbil en agitació en presència d'un fluid newtonià es pot expressar com una funció de les propietats del fluid i de la geometria del conjunt mòbil-cuba d'agitació. Una anàlisi dimensional s'escriu doncs com:

$$N_p = f(\text{Re}, \text{Fr}, \text{We}, \text{factors geomètrics}) \quad (\text{eq. 2.7.1})$$

on:

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} \quad \text{número de potència} \quad (\text{eq. 2.7.2})$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu} \quad \begin{array}{l} \text{número de Reynolds que caracteritza la relació entre} \\ \text{forces d'inèrcia i forces viscoses} \end{array} \quad (\text{eq. 2.7.3})$$

$$\text{Fr} = \frac{d \cdot n^2}{g} \quad \begin{array}{l} \text{número de Froude que caracteritza la relació entre les} \\ \text{forces d'inèrcia i les de gravetat} \end{array} \quad (\text{eq. 2.7.4})$$

$$\text{We} = \frac{\rho \cdot n^2 \cdot d^3}{\gamma} \quad \begin{array}{l} \text{número de Weber que caracteritza l'acció de les forces} \\ \text{inercials en relació a les forces de tensió superficial} \end{array} \quad (\text{eq.2.7.5})$$

amb:

- $\rho$ : massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )
- $d$ : diàmetre del rotor (m)
- $n$ : velocitat de rotació del mòbil d'agitació (voltes/s)
- $\mu$ : viscositat ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
- $g$ : acceleració de la gravetat ( $\text{m/s}^2$ )
- $P$ : potència consumida (W)
- $\gamma$ : tensió superficial (N/m)

Per un sistema de cuba i agitador, sigui quina sigui la naturalesa del fluid, l'equació  $N_p = f(\text{Re}, \text{Fr}, \text{We}, \text{factors geomètrics})$  es redueix a:

$$N_p = K \cdot \text{Re}^x \cdot \text{Fr}^y \quad (\text{eq. 2.7.6})$$

i definint  $\phi = N_p / \text{Fr}^y$ , es pot escriure de la forma

$$\phi = K \cdot \text{Re}^x \quad (\text{eq. 2.7.7})$$

Aquestes dues relacions es tradueixen en una corba anomenada corba característica d'un mòbil d'agitació, donant les variacions de  $\phi$  en funció del nombre de Reynolds. Un exemple de corba característica està donat per la figura 2.7.2. Es poden presentar diversos casos:

- en presència de vòrtex (absència de deflectors):

$$\text{si } \text{Re} < 300 \quad y = 0 \quad \text{i} \quad \phi = N_p$$

$$\text{si } \text{Re} > 300 \quad y \neq 0 \quad \text{i} \quad \phi = N_p / \text{Fr}^y \quad \text{on} \quad y = \frac{a - \log \text{Re}}{a'}$$

amb  $a$  i  $a'$  constants que són funció del sistema cuba- mòbil d'agitació

- en absència de vòrtex (presència de deflectors):

$$\nabla \text{Re} \quad \phi = N_p \quad \text{i} \quad N_p = f(\text{Re})$$

En règim laminar, els paràmetres  $x$  i  $y$  de l'equació  $N_p = K \cdot Re^x \cdot Fr^y$  valen respectivament  $-1$  i  $0$ . La potència consumida és llavors  $P = K \mu n^2 d^3$  i és independent de la massa volúmica i de la presència o no d'un vòrtex, però proporcional a la viscositat.

En règim transitori, l'expressió matemàtica de la corba  $\phi$  en funció del nombre de Reynolds no és generalment simple. Es determina la potència consumida a partir de la corba característica.

En règim turbulent,  $\phi$  és constant. Per una cuba proveïda de deflectors i sense vòrtex, la potència dissipada és independent de la viscositat del fluid.

### 2.7.2.1. Obtenció de la corba model

Una vegada s'ha establert la corba característica relacionant el nombre de potència  $N_p$  amb el nombre de Reynolds per les diferents concentracions de glicerina, s'obté aquest corba que segueix un model potencial, però en aquesta corba es poden observar dues zones que corresponen a règims de flux diferents:

- Una zona amb baix nombre de Reynolds, que es pot ajustar a una recta.
- Una zona amb un nombre de Reynolds elevat on el nombre de potència és pràcticament idèntic per a tots els nombres de Reynolds.

La primera zona correspon al règim laminar segons Metzner i Otto i es pot caracteritzar per una llei del tipus  $N_p = K / Re$ .

En la zona de règim laminar és possible definir una viscositat aparent  $\mu_a$  aplicant l'etapa 4 del mètode de Metzner i Otto, per tant

$$\mu_a = \frac{1}{K \cdot d^3} \cdot \frac{P}{n^2} \quad (\text{eq. 2.7.8})$$

on:

K: constant experimental segons el rotor

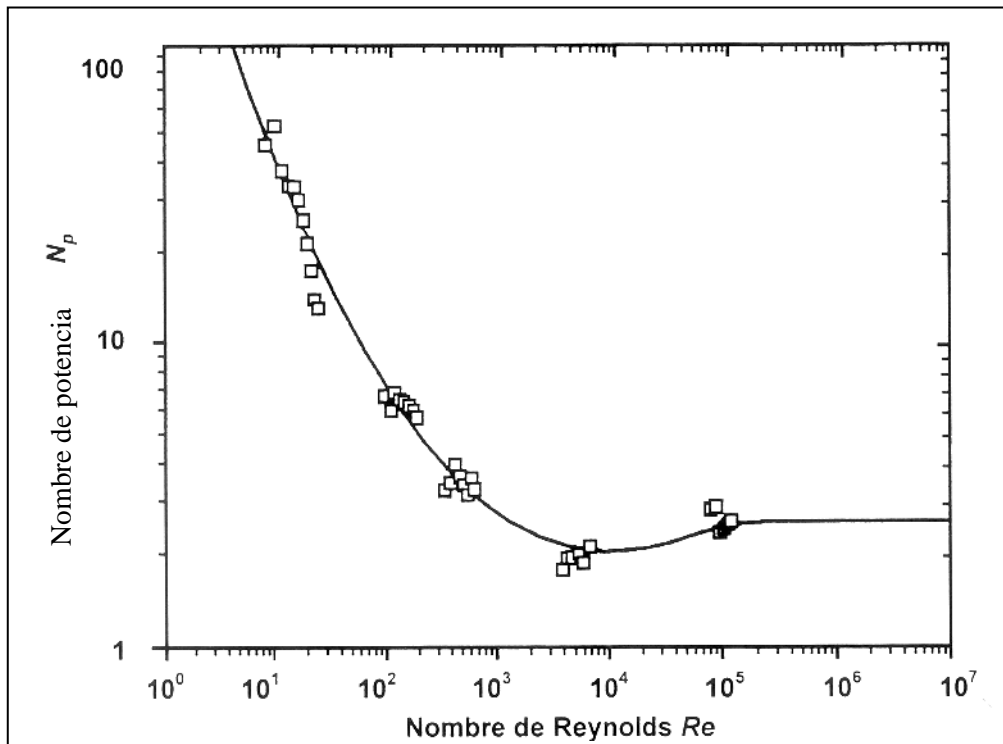
d: diàmetre del mòbil (m)

P: potència consumida (W)

n: velocitat de rotació del mòbil (voltes/segon)

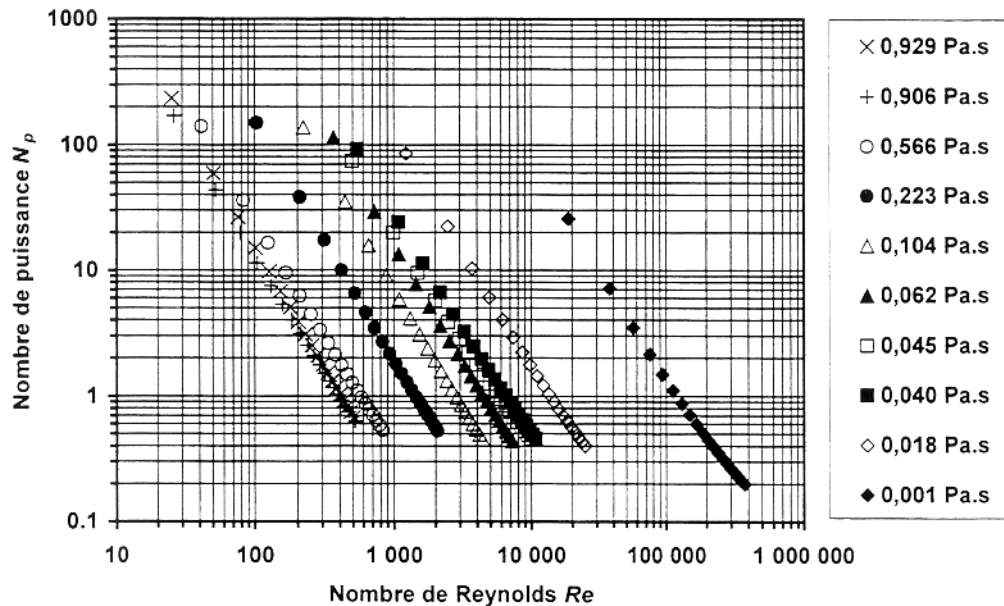
*-Caracterització del púlper amb  $N_p$  i  $Re$* 

En primer lloc en experimentar per determinar la corba característica del púlper relacionant el nombre de potència amb el nombre de Reynolds per fluids newtonians a fi d'obtenir una corba similar a la obtinguda per Bennington et al. (1998) en la figura 2.7.2. S'obtenen un grup de corbes, que es representen en escala logarítmica per apreciar més els marges on estan situades, com es pot veure en la figura 2.7.3.



**Figura 2.7.2:** Corba característica d'un púlper amb rotor helicoidal, obtinguda amb un fluid newtonià (Bennington et al., 1998)





**Figura 2.7.3:** Família de corbes que caracteritzen el púlper helicoidal (Fabry,1999)

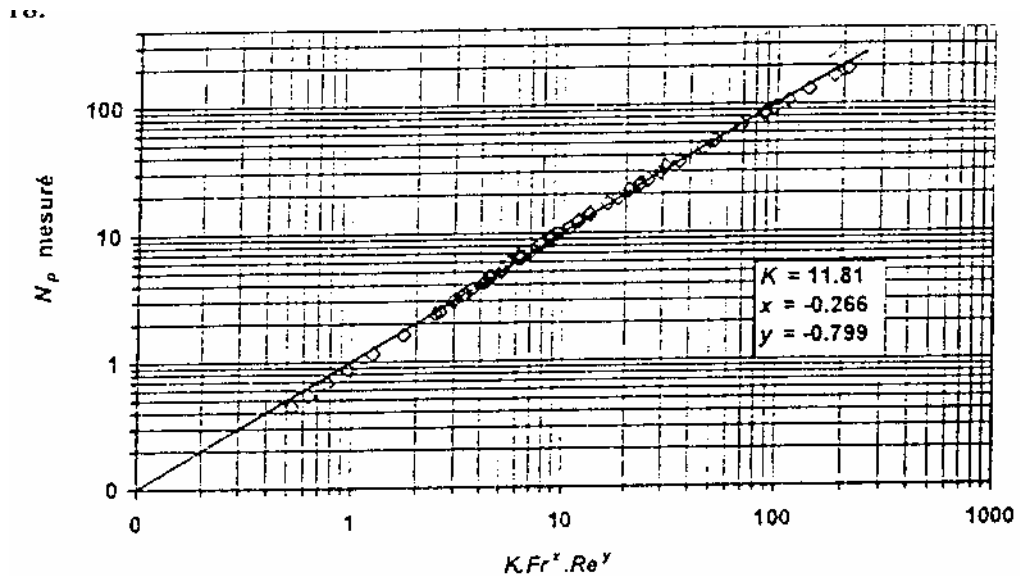
Quan la velocitat de rotació del rotor augmenta i a causa de la geometria del sistema d'agitació (cuba/mòbil), es pot observar una aireació de la suspensió, amb presència de bombolles d'aire. Aquesta aireació es tradueix per una disminució de la potència consumida. Roustan (1985) ha explicat el mateix fenomen per agitadors del tipus Rushton. Aquest fenomen per una disminució de la massa volúmica de la dispersió gas- líquid i pel comportament hidromecànic dels gasos presents.

*-Caracterització del púlper Helicoidal ( $N_p$ ,  $Re$ ,  $Fr$ )*

El mètode de caracterització adoptat per Bennington et al. (1998) no s'adapta pas als púlper, ja que la presència d'aire condueix a un grup de corbes. Es pot desenvolupar una aproximació: amb ajuda de l'equació desenvolupada per Roustan et al.  $N_p = K \cdot Re^x \cdot Fr^y$  que és més general, i és aplicable a un dipòsit o cuba equipat amb deflectors i amb presència de vòrtex.

La corba característica del mesclador es pot descriure amb l'equació:  $N_p=K \cdot Re^x \cdot Fr^y$  . Els diferents paràmetres es poden determinar mitjançant una regressió multilinear, obtenint els valors dels coeficients K, x i y, a partir de l'obtenció de  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  experimentalment, agitant dissolucions de glicerina corresponents a diferents viscositats, en el púlper, a diferents velocitats del rotor.

La comparació entre els valors de nombre de potència mesurat experimentalment i els valors calculats amb aquests coeficients es poden veure en un gràfic del tipus de la figura 2.7.4.



**Figura 2.7.4:** Número de potència experimental en funció del model  $N_p = K \cdot Re^x \cdot Fr^y$

Observant la figura 2.7.4, es veu que l'expressió derivada de l'equació  $N_p = K \cdot Re^x \cdot Fr^y$  descriu millor la realitat que la de  $N_p = K \cdot Re^x$ . Pel púlpes forma clarament un vòrtex, tot i estar la cuba equipada amb deflectors.

És interessant observar que el nombre de potència associa les forces d'inèrcia (per la velocitat), les forces de gravetat (per l'acceleració de la gravetat) i les forces viscoses. El nombre de potència és un paràmetre adimensional que avalua la dificultat a produir agitació.

Dins les condicions estudiades és possible definir una viscositat aparent  $\mu_a$  com en l'etapa 4 del mètode de Metzner i Otto descrit. Llavors es té:

$$\mu_a = K_1 \cdot n^{k_2} \cdot \rho^{k_3} \cdot Pn^{k_4} \quad (\text{eq. 2.7.9})$$

On,

$\mu_a$  : viscositat aparent (Pa·s)

$n$  : velocitat d'agitació (voltes/s)

$\rho$  : massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )

$Pn$  : potència neta consumida (W)

Per tant, es poden caracteritzar els púlpers amb l'ajuda d'una corba model obtinguda amb fluids newtonians. Per analogia amb el mètode de Metzner i Otto, es pot definir una viscositat aparent  $\mu_a$  d'un fluid com la viscositat d'un fluid newtonià que tindria el mateix consum de potència per a mantenir l'agitació en les mateixes condicions.

Llavors es defineix el factor de cisallament  $\lambda$ , com la viscositat d'un fluid newtonià que produiria el mateix consum de potència per la mateixa velocitat d'agitació (Fabry, 1999). Aquesta definició n'allibera les condicions d'agitació. El factor de cisallament és una analogia matemàtica, el qual té l'objectiu d'englobar les forces que intervenen en el desfibrament: viscositat, acceleració i impacte. Per tant, pel marge de potències obtingudes per deduir l'expressió de la viscositat aparent es pot aplicar a les matèries papereres cel·lulòsiques i conèixer la viscositat de la pasta, o sigui, el factor de cisallament, el qual és un dels paràmetres juntament amb la velocitat i la densitat que afecta el consum de potència neta per desintegrar:

$$\lambda = K_1 \cdot n^{k_2} \cdot \rho^{k_3} \cdot P_n^{k_4}, \quad (\text{eq. 2.7.10})$$

per un marge de  $P_n$  fruit de l'experimentació amb un fluid newtonià.

## **ANNEX 2.1.**

# **Equipaments industrials per l'operació de desintegració**

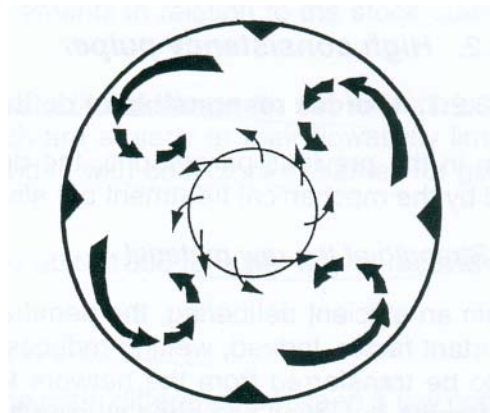


### A2.1.1. Introducció

En aquest annex hi figura informació extreta del recull bibliogràfic publicat per Fabry et al. (2003), referent als diferents tipus de púlpers convencionals i no convencionals i, hi inclou els darrers aparells apareguts al mercat.

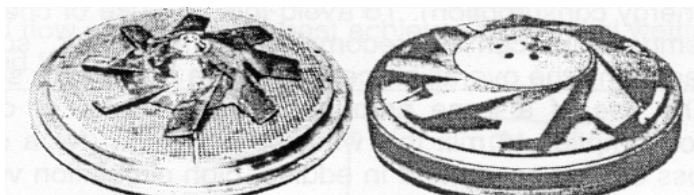
### A2.1.2. Púlpers de baixa consistència.

Realitzen el desfibrat a consistències entre 3 i 8%, i poden operar en continu o en discontinu. En el pulpejat en discontinu és possible arribar a la consistència més elevada. Aquest tipus de púlper, que s'utilitza en cartró ondulat, va ser utilitzat en el període inicial d'aplicació del destintat, però més tard només s'ha utilitzat rarament. Les forces hidràuliques segons Paraskevas, (1983) que tenen lloc en un púlper a baixa consistència es representen en la figura A2.1.1. Aquest tipus de púlper treballa en flux turbulent i s'hi pot observar el vòrtex.



**Figura A2.1.1:** Forces hidràuliques en un púlper (Fallows, 1996)

Els rotors que ofereixen els fabricants generalment són plans i provoquen elevades velocitats perifèriques (de 16 a 20 m/s) veure figura A2.1.2.



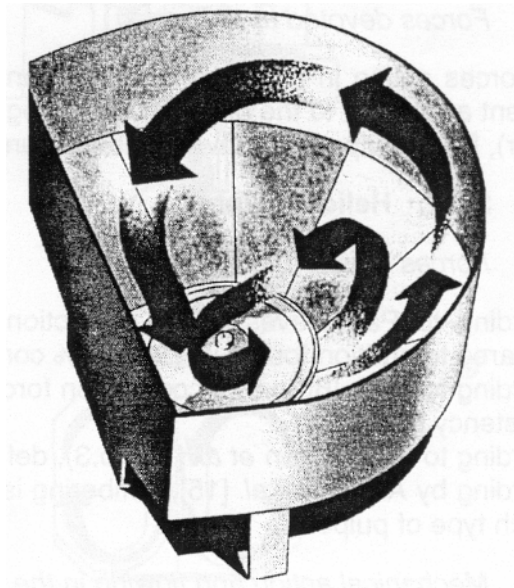
**Figura A2.1.2:** Rotors per baixa consistència proposats per Maule (esquerra) i Black-Clawson (dreta)

El temps necessari per obtenir un desfibrat suficient varia en funció de la matèria primera, per a un determinat púlper continu a baixa consistència: de 6 a 8 minuts per ONP, i per obtenir un desfibrat del 90 al 95%, segons Cleveland (1993). El temps de desfibrat augmenta considerablement quan el paper a desfibrar és resistent a la humitat.

Per un púlper en discontinu, el temps de desfibrat sol ser de 15 a 17 minuts. Per obtenir un bon nivell de desfibrat el consum d'energia necessari està entre 20 i 50 kWh/t depenent del paper i de la mida del púlper.

Generalment el tanc és un cilindre, però hi ha excepcions, com es pot observar en la figura A2.1.3 on es mostra un tanc en forma de D, que permet un desfibrat més homogeni i més ràpid. Això origina un estalvi en el consum energètic (del 20% comparat amb un tanc convencional) i una producció més elevada (fins a un 30% més) segons Grantz (1984).

L'avantatge o millora és deguda al canvi en el perfil de flux, representat en la figura A2.1.4.



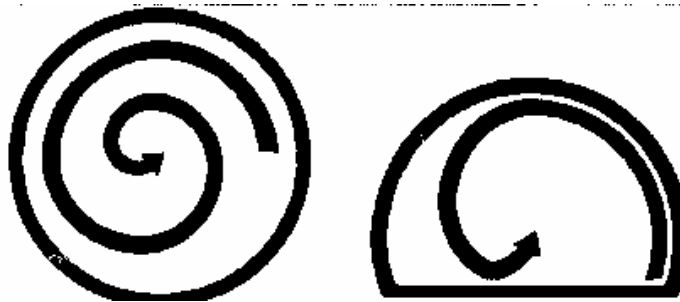
**Figura A2.1.3:** Púlper "D" proposat per Black-Clawson (Grantz, 1984)

Els principals desavantatges dels púlpers de baixa consistència són:

- elevat consum energètic (una gran quantitat de l'energia és consumeix en agitar l'aigua)

- elevat nivell de fragmentació dels contaminants, degut a l'elevada velocitat perifèrica del rotor, que dificulta la seva posterior eliminació.
- Poca eficàcia dels reactius químics a causa de la seva dilució en l'elevat volum d'aigua.

Aquest tipus de púlper, que encara s'utilitza en el procés convencional de cartró ondulat, es va utilitzar en els inicis de l'aplicació del destintat, però ha caigut en desús. Els desavantatges d'aquest tipus de púlpers van obligar als fabricants a investigar noves tecnologies que varen conduir al disseny de púlpers d'elevada consistència.



**Figura A2.1.4:** Trajectòries de circulació en un púlper convencional comparades amb un púlper "D" (Grantz, 1984).

### A2.1.3. Púlpers d'elevada consistència

Forces responsables del desfibrat. Com s'ha vist en els apartats anteriors, el desfibrat de papers recuperats és funció de les forces induïdes en el tractament mecànic i de la resistència del paper que es tracta.

Resistència de la matèria primera. Per tenir un desfibrat eficient, la velocitat de penetració de l'aigua entre les fulles i en els flocs és un factor important. El mullat redueix la resistència de la xarxa fibrosa, i així es redueixen les forces necessàries per desfibrar.

La influència del mullat en la reducció de la resistència del paper ha estat estudiada per Brouillette et al. (2000)

Si el mullat no és prou ràpid i amb una quantitat d'aigua suficient, el temps de pulpejat augmenta (i el consum d'energia). Per prevenir aquest problema és aconsellable utilitzar productes químics com la sosa o augmentar la temperatura del púlper.



Tanmateix aquestes solucions poden tenir alguns efectes negatius sobre el conjunt del procés, com la dissolució de substàncies i el despreniment de “stickies”, segons Fabry (2002).

La utilització de grans quantitats d'aigua millora l'eficàcia de mullat, però l'energia necessària per moure aquesta aigua és elevada, i pot representar fins a un 60 o 80 % de pèrdua de l'energia total subministrada pel motor, si es treballa a elevada velocitat, segons Siewert (1984).

Per altra banda, si la quantitat d'aigua és insuficient la reducció de forces de la xarxa fibrosa és insuficient i l'increment de consum d'energia és també igualment important.

Forces implicades en el desfibrat. Les forces que actuen en el púlper i són responsables del desfibrat en un púlper d'alta consistència són diferents segons les tecnologies utilitzades: púlper convencional amb rotor (púlper helicoïdal) púlper de tambor, púlpers no convencionals (explosió, agitador planetari).

### **A2.1.3.1. Púlper helicoïdal**

Forces implicades en el desfibrat.

- Segons Paraskevas (1983) en el rang de consistències de 8 a 18%, les forces de fricció entre fibres són les principals responsables del desfibrat, comparades amb les forces d'impacte.
- Segons Holik (1988) les forces d'acceleració prop del rotor són responsables del desfibrat en un púlper d'alta consistència.
- Segons Bennington et al. (1998) el desfibrat és funció de l'àrea escombrada pel rotor.
- Segons Amaral et al. (2000) el desfibrat es fa més ràpid si s'augmenta la potència instal·lada en aquest tipus de púlper.

Acció mecànica i flux dins el púlper. El rotor manté en moviment a la suspensió de fibres (mescla) i desfibra el paper i els flocs (desfibrat).

Les forces desenvolupades pel rotor són de gran importància, i la seva intensitat depèn de la construcció, dimensions i velocitat del rotor. Per fer possible el moviment de la suspensió en un púlper d'alta consistència, el rotor ha de tenir suficient diàmetre i alçada (Pfalzer, 1983 i Merrett, 1987).

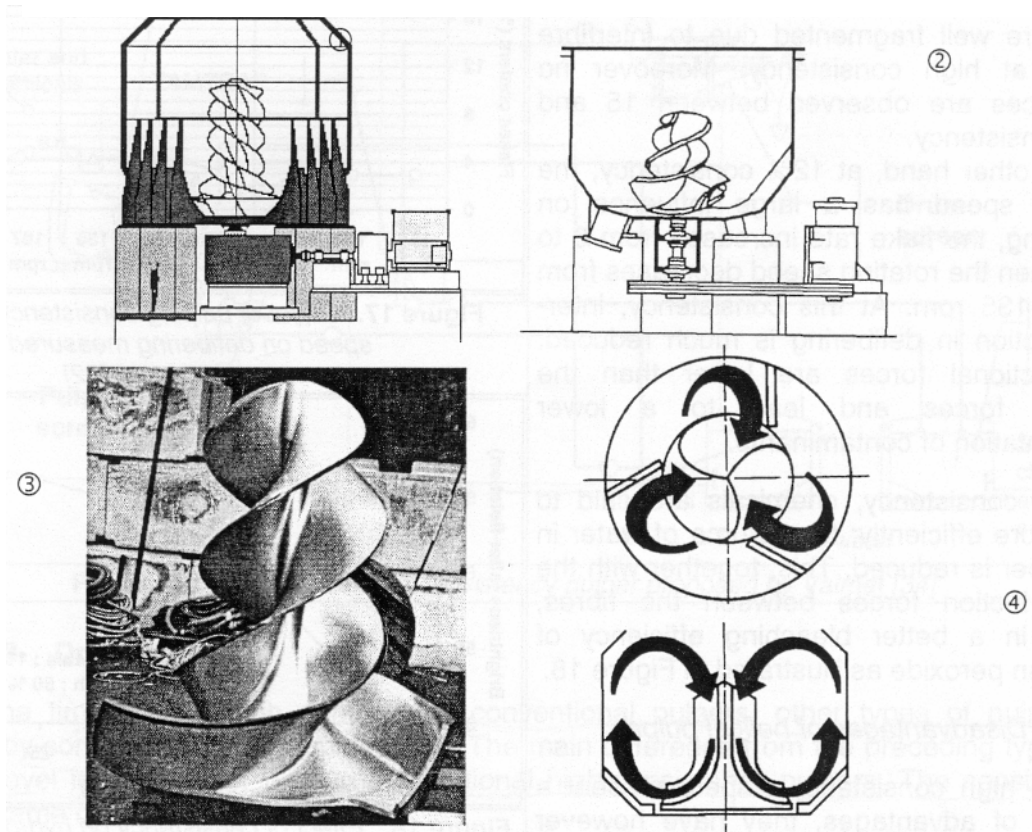
En general, la velocitat de rotació òptima, és més baixa que en pùlpers de baixa consistència: entre 8 i 15 m/s en comparació amb els 16 a 20 m/s per un púlper de baixa consistència. Per altra part, la velocitat del rotor pot operar a diferents velocitats comparada amb el flux de suspensió segons Savolainen et al. (1983).

Per obtenir un procés de pulpejat homogeni, és important tenir una elevada relació d'impacte sobre el rotor. Ja que la velocitat relativa diferencial entre el rotor i la suspensió pot ser gran i la circulació molt lenta, una elevada relació d'impacte només es pot assegurar pel disseny del rotor (nombre i forma dels elements de treball, en relació a la quantitat de material) i pel temps de permanència en el púlper, segons Siewert (1984).

També és important la forma del púlper. Els perfils irregulars de flux no s'equilibren cap a fora tan fàcilment amb suspensions d'elevada consistència, que estan quasi en el límit de fluència (Siewert, 1984). Per obtenir un flux més regular, les parets del púlper es poden equipar amb deflectors per guiar el flux.

El volum del tanc pot arribar als 115 m<sup>3</sup>, que permet tractar fins a 1000 tones de paper recuperat per dia, en un púlper helicoïdal.

Disseny del rotor. Per poder portar a terme el procés de pulpejat a aquesta consistència, la principal diferència amb un púlper de baixa consistència està en la forma del rotor, que és generalment helicoïdal. En la figura A2.1.5 es poden veure exemples de pùlpers d'elevada consistència: Púlper helicoïdal de Lamort-Aikawa segons Lamort (1976), Lamort et al. (1980) i Aikawa et al. (1982); púlper HDS de Voith-Sulzer (2000). En la figura A2.1.5 es representa també el perfil de flux desitjat per aconseguir tan un bon mullat inicial, com el desfibrat total desitjat, segons Koffinke (1983).



**Figura A2.1.5:** Exemples de púlpers helicoïdals: 1- púlper HDS (Voith-Sulzer). 2- púlper Helicoïdal (Lamort-Aikawa). 3- rotor helicoïdal (Lamort). 4- perfil de flux en un púlper helicoïdal.

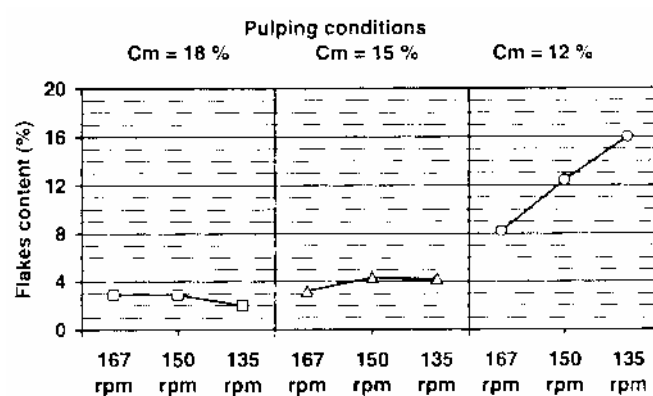
Avantatges del púlper helicoïdal comparat amb el púlper de baixa consistència. Els principals avantatges són els següents:

- Millor desfibrat a consistència elevada (15%)
- Consum d'energia inferior (entre 15 i 30 kWh/t)
- Temps de pulpejat inferior
- Menys fragmentació dels contaminants, que en permet una millor eliminació
- Millor eficàcia dels reactius de destintat, que produeix un millor despreniment i dispersió de la tinta
- Reducció del consum d'aigua

Amb el repulpejat a baixa consistència, una gran part de l'energia aportada es consumeix en mantenir en circulació la gran quantitat d'aigua, i no en el procés de separació de les fibres.

Quan s'augmenta la consistència l'efecte de desfibrat millora degut a una fricció entre fibres més efectiva. Les forces són més freqüents que les forces de fregament. La conseqüència és un consum energètic inferior (Savolainen et al., 1991; Siewert, 1984 i Merret, 1987), i pot arribar a un estalvi del 70% d'energia (Koffinke, 1983) i un temps de pulpejat inferior del 20 al 50% (Paraskevas, 1983; Savolainen et al., 1991 i Koffinke, 1983).

El desfibrat degut a les forces de fricció i de fregament sobre el rotor és més ràpid que amb les forces d'impacte sobre les parts metàl·liques. Aquestes forces de fricció estan ben il·lustrades en la figura A2.1.6, que mostra la influència de la velocitat del rotor en el desfibrat (en front del contingut en flocs).



**Figura A2.1.6:** Efecte de la consistència de pulpejat i la velocitat de rotor en el desfibrat mesurat com a contingut en grumolls.

A consistències convencionals en el púlper Helicoïdal (18 i 15%) la velocitat de rotació del rotor té poca influència en la fragmentació dels contaminants i dels flocs, aquests es fragmenten eficaçment per la fricció entre fibres que es produeix a elevada consistència. No s'observen diferències entre 15 i 18% de consistència.

Per altra part, al 12 % de consistència la velocitat de rotació té una gran importància en el desfibrat, el contingut en flocs augmenta de 8 a 16% quan la velocitat de rotació disminueix de 167 a 135 rpm. A aquesta consistència la fricció entre fibres es redueix. Les forces de fricció són inferiors a les forces de fregament i donen una fragmentació de contaminants inferior.

A alta consistència s'ha dit que els productes químics treballen més eficaçment: el volum d'aigua es redueix. Això, conjuntament amb les forces de fricció entre fibres més elevades, dóna una millor eficàcia de blanquejat del peròxid d'hidrogen, tal com es mostra en la figura A2.1.7.

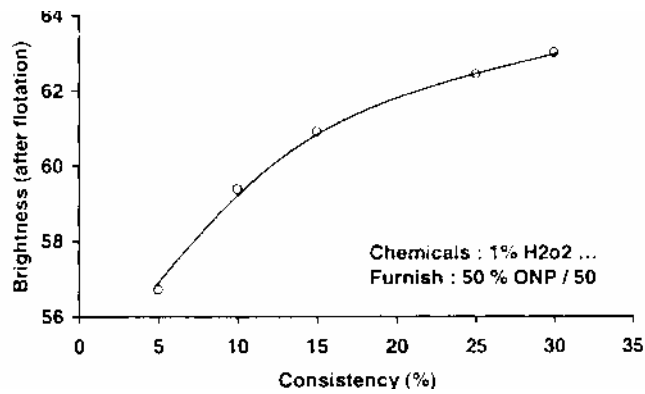


Figura A2.1.7: Efecte de la consistència en el blanqueig amb peròxid d'hidrogen.

Desavantatges del púlper helicoidal. Si aquests púlper tenen un gran nombre d'avantatges, també tenen dos desavantatges principals que són:

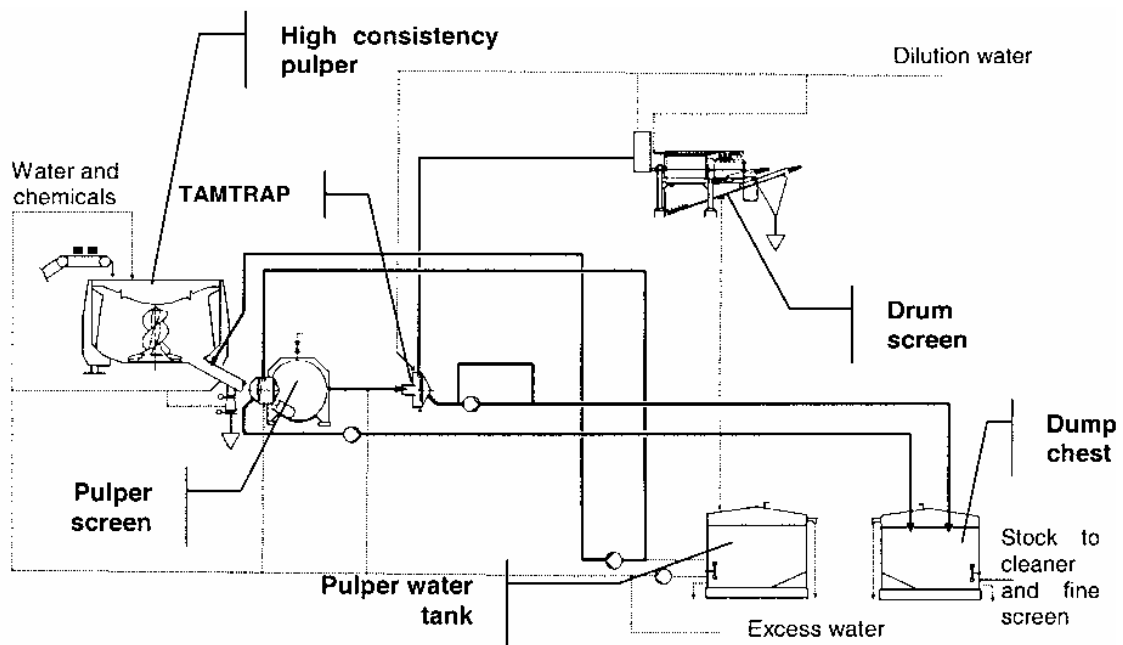


Figura A2.1.8: Púlper continu a alta consistència, proposat per Valmet .Nerg et al. (1999)

Les càrregues de paperot s'hi incorporen discontinuament, cosa que no succeeix en els púlper de baixa consistència de cartró ondulat. Aquest desavantatge es pot

considerar també com a avantatge perquè d'aquesta manera millora el control de la qualitat de la pasta. No hi ha extracció contínua dels contaminants com n'hi ha en els púlpers de baixa consistència.

#### **A 2.1.4. Darreres millores**

El 1999 Valmet va desenvolupar un nou sistema de pulpejat en continu a elevada consistència (CHD pulping, figura A2.1.8) per paper domèstic (ONP/OMG) i MOW, (Nerg et al., 1999). En aquest aparell la matèria primera s'alimenta contínuament a un púlper d'alta consistència connectat a un púlper de pantalla. El material acceptat després del púlper de pantalla va a dues etapes de screening essent ja classificat grosserament.

Les impureses grans s'eliminen del púlper de pantalla amb un púlper secundari. L'acceptat del púlper secundari va a parar junt amb l'acceptat del púlper de pantalla. El material rebutjat alimenta un tambor rotatiu de pantalla on el rebuig és rentat i les fibres perdudes es recuperen utilitzant l'aigua que les conté com a diluent pel púlper HC. Els assaigs en el centre tecnològic de Valmet mostren que l'estratègia funciona bé, però no s'ha descrit cap cas industrial.

Els principals avantatges d'aquest sistema de pulpejat comparat amb un púlper d'alta consistència tradicional en discontinu són els següents, segons els autors:

- els avantatges d'un púlper tradicional en discontinu a alta consistència
- l'inici del procés de destintat es fa de la manera més simple possible
- és un sistema de pulpejat en continu a alta consistència
- alt rendiment en fibres (pulpejat + tamisat)
- baix cost d'inversió

Púlper de tambor. Al mateix temps que els púlpers convencionals d'elevada consistència, s'han desenvolupat altres púlpers pels fabricants de maquinària (Iwamoto, 1982). La principal diferència amb els púlpers anteriors és que el nivell de cisallament és inferior mentre la consistència igual o superior.

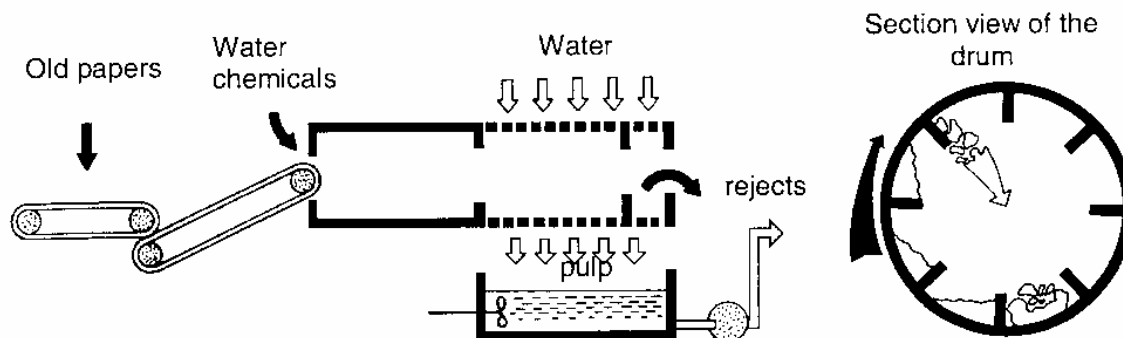
El moviment de fibres. Aquest púlper de tambor dissenyat per Ahlström consisteix en un tambor rotatori d'acer amb un diàmetre entre 2,5 i 4 metres. Un costat del tambor és la zona alta consistència on té lloc el desfibrat i la impregnació química, en la zona

següent es separen els materials de rebuig de les fibres, i es descarreguen per l'altre extrem del tambor. En tot el tambor hi ha pantalles i plaques mescladores.

El tambor està lleugerament inclinat per tal de que el contingut avanci axialment des de la zona de desintegrat a la de filtrat. La llargada (de 15 a 40 metres) i l'angle (aproximadament 1°) està dissenyat per donar un temps de retenció de 20 minuts, en els que tindrà lloc el desfibrat.

Un dispositiu patentat transfereix el material desintegrat a una zona de pantalla perforada on un sistema de dutxat redueix la consistència a un nivell adequat per ser bombat i l'eliminació de pesants a alta consistència.

En la figura A2.1.9 es mostra un diagrama d'aquest equip, que consumeix entre 15 i 25 kWh/t segons el material que es tracti. La seva capacitat és de 50 a 1000 tones per dia segons el model.



**Figura A2.1.9:** Sistema de pulpejat per circulació en tambor (Iwamoto, 1982; Himanen, 1995).

Principi de funcionament (Himanen, 1995; Momdouh et al., 1990). La matèria primera es mulla químicament tan a l'entrada com a la zona de desfibrat, fins a una consistència de 15%. Amb la combinació de rotació i "lifters" es tomba un nombre predeterminat de vegades durant el recorregut per la zona de desfibrat. Aquesta acció produeix unes suaus però efectives forces que desfibern el paper amb una mínima desintegració dels contaminants.

Segons Vireä (1983) el desfibrat de paper recuperat humit requereix una potència més gran que la resistència en mullat del paper. Quan el material cau d'una alçada H sobre el punt de xoc, l'energia potencial  $mgh$  es converteix en energia cinètica  $\frac{1}{2}mv^2$ . Quan

cau de nou sobre la superfície metàl·lica del tambor a la velocitat  $v$ , el material xoca, es deforma, comprimeix i dispersa. L'impuls en la direcció de la caiguda canvia durant un petit temps  $\Delta t$ , segons la següent equació:

$$m \cdot v = \int f \cdot dt \quad (\text{eq. A2.1.1})$$

El procés d'una caiguda individual és insuficient per provocar el desfibrat total. La caiguda s'ha de produir  $N$  vegades des de l'alçada  $H$ .

La tinta, partícules, làmines i substàncies "hot melt" es desprenen de les fibres. El material recollit en el fons se selecciona, i només les partícules més petites poden passar cap al fons amb les fibres acceptades. Aquests contaminants es poden eliminar fàcilment més tard.

Els principals avantatges en comparació amb un púlper convencional d'alta consistència són:

- mínim fraccionament dels contaminants.
- màxima conservació de les característiques físiques de la fibra.

La principal diferència, comparat amb els pùlpers convencionals d'alta consistència és que el púlper de tambor treballa en continu. La confiança en la qualitat del pulpejat, en canvi, és més difícil de controlar.

El púlper de tambor és més adequat per tractar grans contaminants. Aquest tipus de púlper elimina suaument el plàstic dels fulls de paper resistents a la humitat, sense haver d'aturar el procés de pulpejat. El púlper en discontinu d'alta consistència també és un bon aparell quan la quantitat de contaminants no és gaire important, i especialment quan la qualitat del material varia.

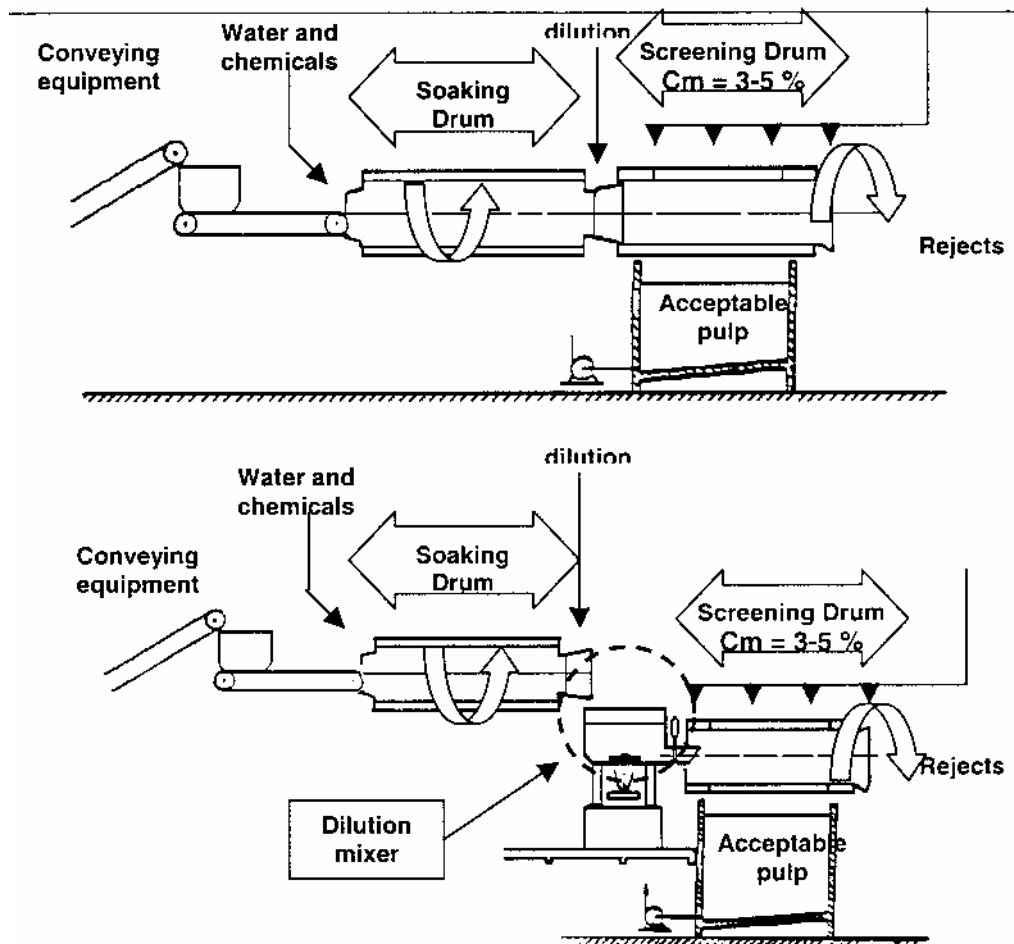
Els avantatges del púlper de tambor en comparació amb els pùlpers industrials de baixa consistència són: nivell de contaminació inferior, inferior requeriment de qualitat de la matèria primera respecte del que és estàndard actualment en les línies de destintat (Emery et al., 1998).

Tambor Finckh segons Lindsay (1983). El fabricant de maquinària Finckh també proposa dos sistemes diferents de pulpejat en tambor, en funció de la qualitat de la



matèria primera. Per ONP i OMG el sistema es compon de dos tambors consecutius horitzontals independents (figura A2.1.10, superior). El segon gira en sentit invers al primer. El primer tambor desfibra al 15 % de consistència, amb productes químics, el segon és un curt pre-tamisaat amb la pasta diluïda al 3-5 %. Les fibres de l'acceptat passen per les ranures del tambor i es recullen en el tanc. El rebuig es recullen a la sortida del segon tambor.

Amb paper difícil de reciclar (cartró ondulat, paper resistent a la humitat...) el sistema difereix: la pasta es recull en un tanc de dilució i barreja abans de passar al segon tambor destinat al tamisaat (figura A2.1.10, inferior).

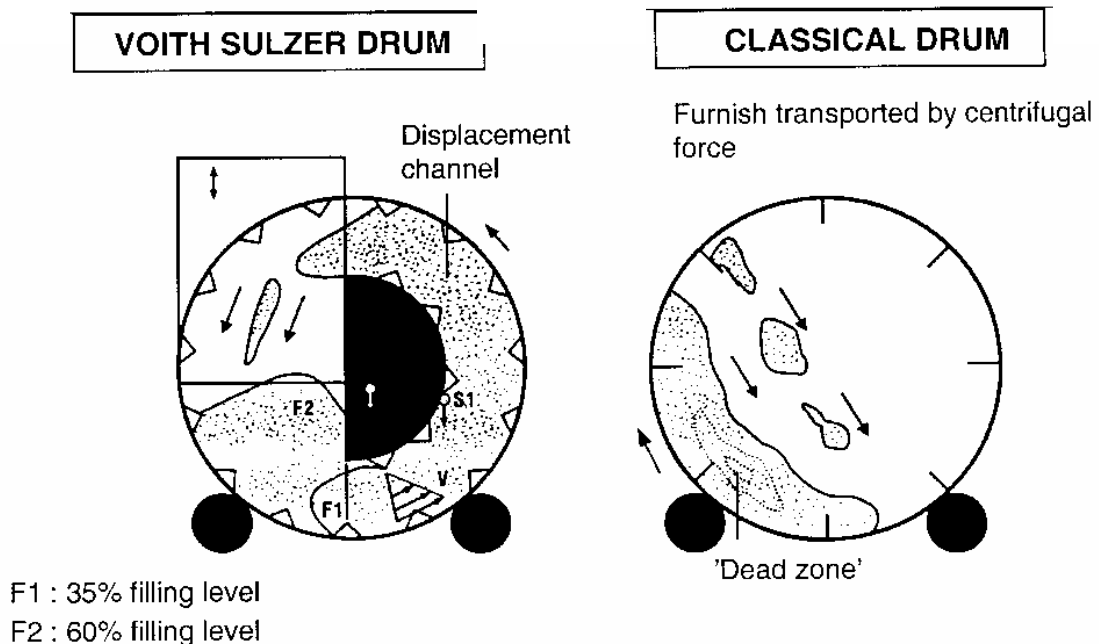


**Figura A2.1.10:** Sistemes de tambor Finckh per paperot convencional, usat en una planta de destintat (superior) i per matèria primera difícil de pulpejar (inferior) (Lindsay, 1983)

TwinDrum púlper de Voith Paper segons Fisher et al. (2002). Aquest púlper de tambor es va presentar el 2000 per "liquid packaging board lines" per Muller (2000) i més

recentment per la línia de destintat (80% ONP/20% OMG) novament per Fisher et al. (2002).

El púlper de tambor Voith Sulzer consisteix principalment en un tambor rotatiu entorn d'un centre estacionari amb perfil de D. El tambor i la paret del dispositiu central formen un canal de desplaçament semi-anular en que el material és arrossegat cap amunt des del fons del púlper (figura A2.1.11). Les forces de cisallament en el canal de desplaçament generen intenses forces de fricció entre fibres, assegurant un intens amassat i caiguda de la pasta. La pasta circula per sobre del dispositiu central i cau al fons pels dos costats. Aquest moviment continuat d'amassat, mullat i estovat al llarg del tambor, assegura un abundant i eficient pulpejat.



**Figura A2.1.11:** Principi del púlper de tambor Voith Sulzer (esquerra) comparat amb el principi del púlper convencional de tambor (dreta) (Müller, 2000)

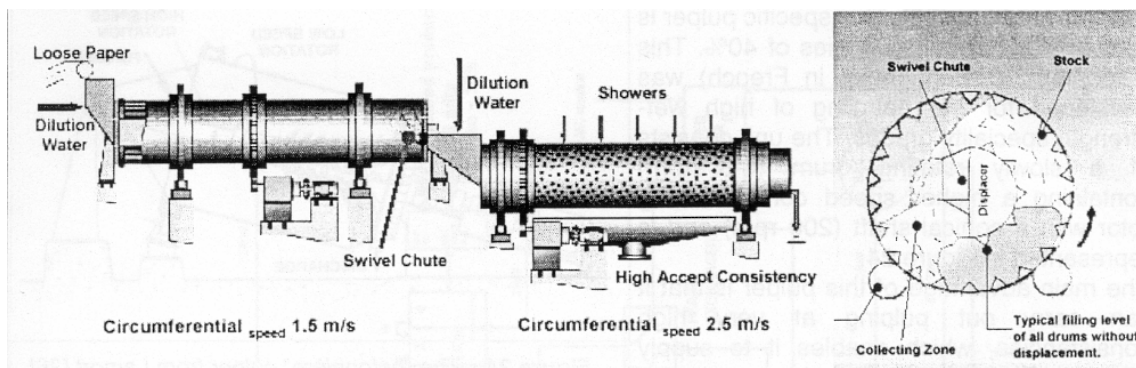
Els principals avantatges segons Müller (2000) en comparació amb un púlper convencional de tambor són els següents:

- Gran capacitat de pasta per un mateix volum
- tambor més compacte per aconseguir el desfibrat per una mateixa quantitat de paperot

- variant la quantitat alimentada es pot ajustar el temps de residència

Aquest Twin Drum púlper s'ha modificat per utilitzar-lo en el destintat (figura A2.1.12)

- El tambor de desfibrat i el de sortida se separen per operar cadascun en les condicions òptimes (velocitat de rotació, consistència i temps de residència). El tambor de sortida treballa a velocitat de rotació elevada, per obtenir una major àrea efectiva de tamisat en el fons del tambor, i així poder-ne reduir la llargada del tambor.
- A la sortida del tambor de desfibrat hi ha un dispositiu que controla el nivell de pasta en l'interior, i la condueix en el canal de sortida.



**Figura A2.1.12:** El principi del Doble Tambor (esquerra) amb l'àrea de desfibrat a la dreta (Fischer, 2002)

Es poden ajustar diversos paràmetres segons els requeriments del destintat: velocitat de producció, dosificació de productes químics de destintat, consistència de desfibrat (fins al 30%), consistència mitjana i consistència de sortida del tambor. Hi ha dades industrials: per 770 BDMTPD (80% ONP / 20% OMG) pulpejat a 27%, transferència al 7% i sortida al 4,5%.

### A2.1.5. Púlper no-convencional. Tecnologia d'explosió de vapor.

El procés d'explosió per paper recuperat va tenir el seu inici a Austràlia als anys 60 amb el nom de siro-pulping. Aquest procés utilitzava elevada pressió de fins a 1000 psig, temperatura de 160° C i una descompressió explosiva per a desfibrar el paperot. El mètode no era eficaç en tots els tipus de paperot i va caure en desús.

Després d'aquest inici, hi ha hagut millores recentment i s'ha assajat en laboratori per Mentz (1991) i a escala pilot. El resultat que s'han donat indiquen que el procés d'explosió amb vapor és capaç de processar fibres que són impossibles o molt costoses de processar amb la tecnologia tradicional de destintat. El procés d'explosió amb vapor elimina la necessitat d'hidropúlper, cel·la de flotació i unitat de dispersió d'un sistema convencional.

El procés amb vapor és una alternativa efectiva al procés de destintat convencional que es pot instal·lar en la meitat de temps i amb estalvis considerables (Stinson, 1991; Cox, 1991). Pot processar material de baixa qualitat i produir pasta de qualitat.

Alguns assaigs recents a escala pilot i industrial han donat els següents resultats:

- el procés d'explosió amb vapor ha demostrat dispersar ceres, tintes i làtex.
- Altres contaminants com plàstics, hot-melts i papers resistents a la humitat es desintegren químicament.

S'han donat resultats comparatius entre diferents seqüències de destintat a escala de laboratori i les millors propietats físiques (Ruzinsky et al., 2000).

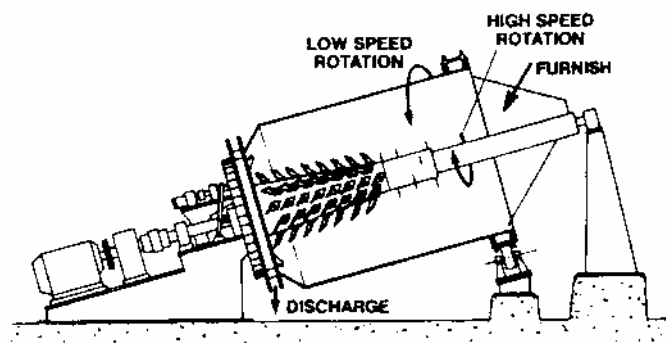
Descripció del procés:

- eliminació dels contaminants pesats
- triturat i mullat del paperot al 50% de consistència
- el paper mullat alimenta a un pistó recíproc que el comprimeix i envia a la cambra on és tractat amb vapor a alta pressió i temperatura (28 bars i 230°C). El paper travessa el digestor de 13 metres de diàmetre en un temps de 30 segons a 6 minuts. Un vissefí porta el material a una vàlvula a través de la que es descomprimeix sobtadament fins a pressió atmosfèrica.

Aquesta tecnologia, encara que usada en el desfibrat de materials especials, ja no s'utilitza per paperot. Les condicions de pulpejat molt dures poden ser un desavantatge per l'eliminació de contaminants.

Púlper formigonera. Aquest tipus de púlper va aparèixer a principi dels anys 80 (Lamort, 1976). Pot treballar al 40% de consistència i fou desenvolupada per tractar paper d'alta resistència en mullat. Consisteix en un tambor rotatiu lent (6 a 8 rpm) amb un rotor intern d'elevada velocitat a contradirecció amb un eix cònic (200 rpm), que es representa a la figura A2.1.13.

El principal avantatge d'aquest púlper és que pot treballar a molt elevades consistències i passar directament a una etapa de dispersió, sense cap intermig. No es coneix la seva utilització en destintat.



**Figura A2.1.13:** El púlper "formigonera" de Lamort (Lamort, 1976)

Sistema de rentat industrial. De la mateixa manera que la recuperació de paper, el rentat de matèries tèxtils es fa en un sistema de rentat industrial (figura A2.1.14) amb una acció mecànica, uns productes químics, temperatura i temps. El mateix procés i tecnologia aplicat a les matèries tèxtils, es pot aplicar també al paperot.

Aquest procés s'ha aplicat amb èxit en el destintat de paper de diari segons Mulligan (1995). Utilitzant un procés de rentat comercial en diverses etapes. La qualitat de la pasta obtinguda és excel·lent, amb un consum baix d'energia i uns requeriments modestos en quant a equipaments.

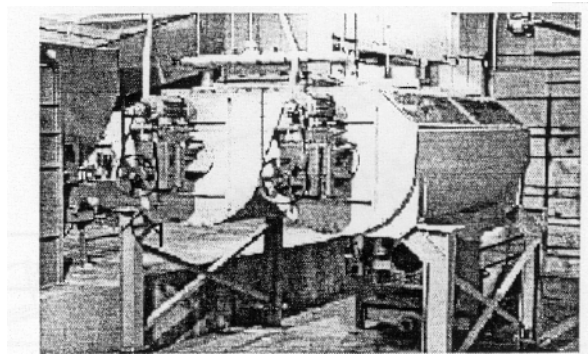
El principal avantatge descrit per aquest procés és que elimina totes les petites partícules de tinta despreses, sense redeposició sobre les fibres. Aquest pot ser un gran avantatge en les tintes base aigua si s'aplica un tractament eficient a l'aigua.



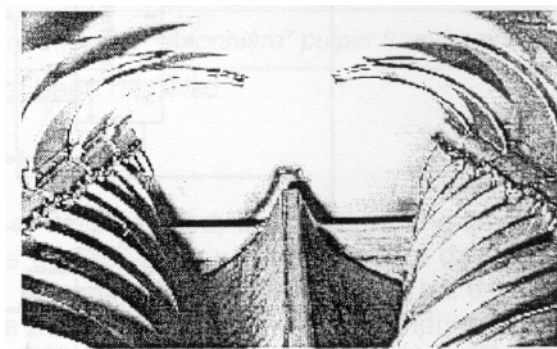
### A2.1.6. Púlper de doble rotor

La companyia Fiber Recycling Technologies (FRT, de Neenah, Wisconsin) ha desenvolupat recentment aquest nou tipus de púlper, que es mostra en la figura A2.1.15. Té un rotor doble horitzontal (figura A2.1.16) girant en sentits oposats a 40 rpm, que provoca una freqüent acció fibra-fibra amb baix fregament en les fibres i els contaminants, segons Button et al. (2002). El púlper pot operar tan en continu com en discontinu.

En la comparació entre aquest púlper i un púlper convencional a baixa consistència destaca el menor consum energètic del púlper convencional, encara que segons Button és degut que en els experiments amb púlper convencional s'ha treballat a temperatura elevada.



**Figura A2.1.15:** Vista del púlper de rotor doble (Button et al., 2002)



**Figura A2.1.16:** Interior del púlper amb vista parcial dels rotors (Button et al., 2002)

### **A2.1.7. Mesclador planetari.**

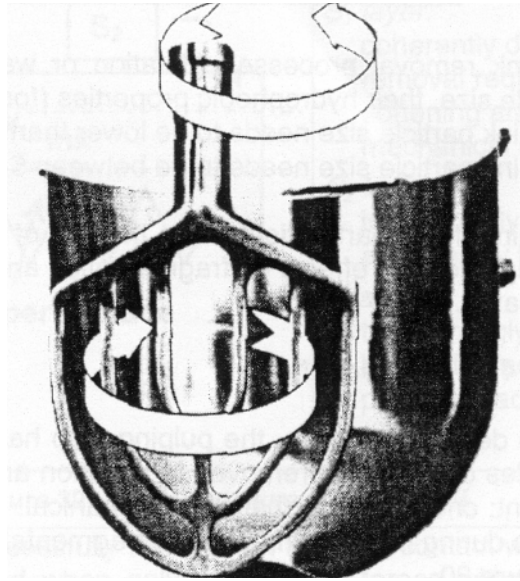
Aquest tipus de mesclador s'utilitza en assaigs de laboratori (Lafon, 1997; Ackermann et al., 1997; Tremblay et al., 1998; Harrop et al., 1999 i Fabry et al., 2000). Pot treballar al 20% de consistència amb 100% de ONP. Un exemple d'aquest púlper no convencional es pot veure a la figura A2.1.17.

El procés de desfibrat es basa en l'aplicació d'una intensa força d'impacte distribuïda uniformement entre les pales del rotor i els costats de la paret del púlper. L'avantatge d'aquest sistema de mescla és el canvi constant de la posició de les pales a causa del seu moviment planetari entorn de l'eix del rotor. El canvi continu de la posició de l'agitador no necessita el moviment de la pasta com en un púlper convencional. Es pot treballar amb ONP 100% fins al 20 de consistència, mentre que la limitació en un púlper convencional helicoidal és del 9% (Fabry et al., 2000).

En un aparell convencional la zona de cisallament està localitzada entorn del rotor i la pasta va cap a aquesta àrea, on es desintegra, per això és necessari el moviment de la pasta cap a la zona de desintegració. En el mesclador planetari, gràcies al desplaçament de l'agitador, és l'àrea de cisallament la que es desplaça per tot el púlper actuant sobre tota la pasta sense necessitat que sigui aquesta la que es desplaça (figura A2.1.18).

De tota manera, cal ser prudent a l'hora de fer comparacions entre aquest púlper i un de convencional, ja que els mecanismes de desfibrat i el tractament de la pasta són diferents.





**Figura A2.1.17:** Exemple de mesclador planetari Hobart (Tremblay, 1998).



**Figura A2.1.18:** Àrea d'acció de l'agitador convencional i del mesclador planetari (Tremblay, 1998)

### **A2.1.8 Cadena de desfibrat**

Cherbit et al. (2004) proposen canviar el púlper convencional per una cadena de desfibrat de matèries homogènies basat en el concepte DHD amb el que aconseguirien un estalvi de més del 60% en energia màssica consumida, millorant els resultats obtinguts.

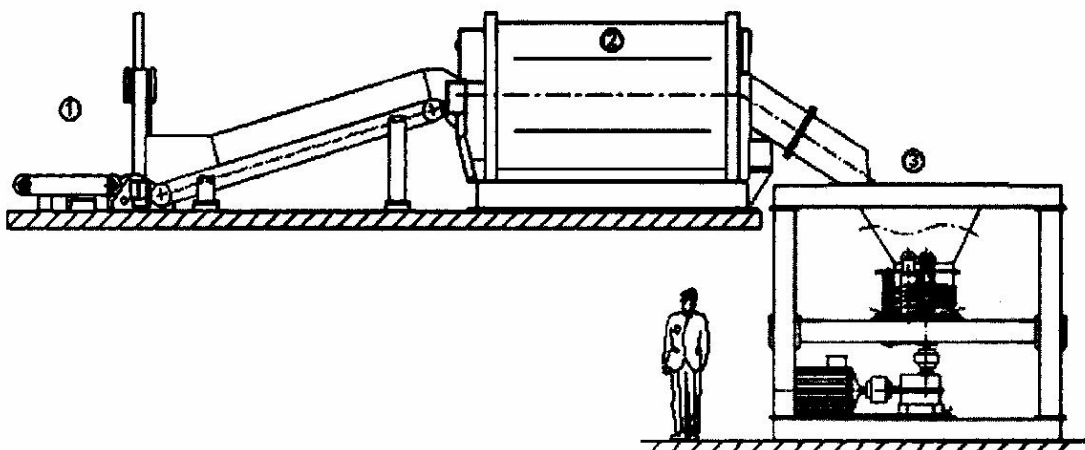
El concepte DHD consisteix en separar els tres processos bàsics que tenen lloc en el púlper: la Desestructuració de les bales de matèria primera, la Hidratació i el Desfibrat.

Per separar aquestes tres operacions han utilitzat una instal·lació industrial de tractament de 110 t/dia treballant en continu, donant a cada operació les condicions més favorables per obtenir un rendiment òptim.

Segons els autors, el púlper convencional té diversos defectes de funcionament, entre els quals:

- la matèria està el 90% del temps fora de l'acció del rotor
- en els primers minuts, la matèria està en contacte amb el rotor sense estar ben hidratada i la desintegració és menys efectiva

En l'aparell DHD fabricat per EMI, (figura A2.1.19) la primera etapa consisteix en desestructurar la bala de matèria primera amb una eina específica com un bis o una guillotina que la talla en dues o tres porcions, i separa els fulls preparant-los per a la hidratació.



**Figura A2.1.19:** Aparell DHD fabricat per EMI. 1. Desestructuració, 2. Trommel de Hidratació, 3. Desintegrador (Cherbit et al., 2004).

La segona etapa es basa en que la majoria de papers en hidratar-se perden del 80 al 90% de la seva resistència a la tracció en els 3 a 5 primers minuts, i en el cas de la cel·lulosa en dos o tres segons. Aquesta etapa es compon d'un trommel, on la matèria es mou regularment, afavorint la separació dels fulls, la seva impregnació i hidratació.

El desfibrat té lloc en un púlper que conté un o més eixos amb els rotors-discs de formes i diàmetres diferents. Uns estators fixats entre les etapes dels rotors fan que la

pasta es retingui en unes dimensions controlades a fi de rebre en un temps curt una potència volúmica intensa (figura A2.1.20). La pasta es tracta a una consistència de 15 a 20% i en unes condicions que transmeten l'energia a la pasta amb un rendiment elevat.

Treballant en continu, aquest sistema utilitza instal·lacions més compactes i simples.



**Figura A2.1.20:** Rotors del desintegrador (Cherbit et al., 2004).

## 2.8. BIBLIOGRAFIA

**Fabry, B. Carré, B. (2003):** 6<sup>th</sup> CTP/PTS Advanced Training Course on Deinking Technology, n° 6, Grenoble, France, March 18-19-20.

**Paraskevas, S. (1982):** "Pulp and Paper", 10, 85-87.

**Paraskevas, S. (1983):** TAPPI Pulping Conference, vol. 1, Houston, 24-26 October 1983, p. 129-132.

**Anderson, S.R., Rasmuson, A. (1997):** *Journal of Pulp and Paper Science*, 23 (1) 5-11.

**Anderson, S.R., Nordsrand, T., Rasmuson, A. (2000):** *Journal of Pulp and Paper Science*, 26 (2) 67-71.

**Siewert, W. (1984):** *Das papier* 38 (7).

**Savolainen, A. et al. (1991):** TAPPI Journal, vol. 71 n° 11, novembre 1991, 147-153

**Holik, H., (1988):** *TAPPI Engineering Conference*, Chicago, 19-22 September, 1988, p. 59-64.

**Pèlach, M.A. (1997):** Tesi Doctoral, Universitat de Girona.

**Bennington C.P.J. (1998a):** *Paper Recycling challenge vol. 3: Process Technology 1998*, Chapter 19, Doshi M.R. & Dyers J.M. Editors, Appleton, 268-282.

**Bennington C.P.J., Smith J.D., Sui O.S. (1998b):** *Journal of Pulp and Paper Science* 24 (11) 341-348.

**Bennington C.P.J., Smith J.D., Sui O.S., Wang M-H. (1998c):** *TAPPI Pulping Conference*, Montréal, October 1083-1095.

**Fabry, B., (1999):** Tesi Doctoral. Institut National Polytechnique de Grenoble.

**Amaral M.E., Renaud M., Roux J-C. (2000):** *Revue ATIP*.54 (3-4) 76-84.

**Mutjé, P, Lopez, A, Puig, J, Vilaseca, F, Pèlach, M.A.(2001):** *Ingeniería Química*, 378, 115-119.

**Metzner A.B., Otto R.E. (1957):** *Journal of American Industrial and Engineering Chemistry* 43 (3) 3 -10.

**Fabry B., Carré B. (2002):** *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 Setembre.

**Kankaanpää V. (2002):** *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 September.

**Lombardo, G. Muratore, E(1992):** *Revue ATIP*(46) 3.

**Savolainen, A. Jussila, T. Nikula, S (1991):** *TAPPI Journal* 74 (11) 147-153

**Vilaseca, F (1999):** *Tesi Doctoral*. Universitat de Girona.

**Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. (1978):** “Fenómenos de transporte : un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento” Reverté 1.3 -1.15.

**Amaral, M.E (1997):** *Tesis Master*. Universidad de Beira Interior.

**Merrett K.J. (1987):** *Appita* 40 (3)185-188.

**Koffinke R.A. (1983):** *TAPPI Pulping Conference vol.1*, Houston, 24-26 October 133-137.

**Hamilton, F.R (1987):** *Pulp & Paper Manufactures*, 3 cap. XVI. Secondary Fibers and Non-Wood Pulping, published by the Joint Textbook Committee of the Paper Industry, TAPPI, CPPA.

**Carré (1995a):** 2<sup>nd</sup> advanced Training Course on Deinking Technology, Grenoble (França) CR 3316.

**Carré B, Galland, G, Julien Saint Amand, F (1995b):** 3rd Research Forum on Recycling Proceedings, Vancouver (Canadà) 73-88.

**Carré, B, Galland, G, Julien Saint Amand, F. (1995c):** 6th PTS Deinking Symposium, München (Alemanya).

**Carré, B, Galland G, Vernac Y, Suty H (1995d):** 2<sup>nd</sup> Advanced Training Course on Deinking Technology, Grenoble (França).

**Vilaseca, F, Gou, M, Pèlach, M.A, Mutjé, P (2000):** Investigación y técnica del papel, 145, 423-438.

**Vielreicher T., Müller-Steinhagen H., Alien M., Duffy G.G. (1994):** *Appita Journal* 47(3) 221-226.

**Gullichsen J., Härkönen E. (1981):** *TAPPI Journal* vol. 64 (6), 69-72.

**Duffy G.G., Longdill G., Lee P.F.W. (1978):** *TAPPI Journal* vol. 61 (8) 85-88.

**Kerekes R.J., Soszynski R.M., Tam Doo P.A. (1985):** 8<sup>th</sup> Fundamental Research Symposium, vol. 1, Oxford, 265-310.

**Kerekes, R.J.(1995):** Internacional Paper Physics Conference, Niagara, 11-14 septembre, 23-31.

**Kerekes, RJ (1996):** TAPPI Engineering Conference, 1, Chicago, 16-19 septembre, 21-28.

**Thalen N, Wahren, D (1964):** Svensk Papperstidning 67 (7) 359-264.

**Thomson H. A (1986):** TAPPI Engineering Conference, 2, Atlanta, 22-25 Septembre 593-596.

**Dosch J.B., Singh K.M., Stenuf T.J. (1986):** TAPPI Engineering Conference, vol.2, Atlanta, 22-25 September 721-722.

**Bennington C.P.J., Kerekes R.J. (1996):** *TAPPI Journal* vol. 79 nº 2, February 1996, p. 253-258.

**Wahren D. (1979):** Conference Paper Science and Technology, Appleton, 8-10 Maig 112-129.

**Thieule J.M (1999):** Tesis Doctoral Institut National Politechnique de Grenoble.

**Blanco M.A., Barbadillo P., Tijero J., Pérez M.J.; Rodríguez F. (1993):** *Cellulosa y Papel (Chile)* 9 (3) 30-34.

**Radoslavova D., Silvy J., Roux J-C. (1996):** TAPPI Papermakers Conference, Philadelphia, 24-27 Març 195-206.

**Chase W.C., Donatelli A.A., Walkinshaw J.W. (1989):** *TAPPI Journal* vol. 72 (5), 199-204

**Hietaniemi J., Gullichsen J. (1996):** *Journal of Pulp and Paper Science* 22 (10) 469-474.

**McCabe (1991):** "Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", Mc Graw Hill, Inc, 3, 41-51.

**Roustan M. Pharamond JC (1985):** Technique de l'Ingénieur, Traité Génie des Procédés J2.II, Opérations Unitaires J3800.

**Bates et. al (1960):** 1, Uhl and Gray, Academic Press, New York.

**Mutjé, P, Vilaseca, F, Puig, J, Pèlach, M.A (2001):** Ingeniería Química, 4, 301-307.

**Bennington, C.P.J (1988):** Tesi doctoral. Universitat de British Columbia.

**Yackel C. (1990):** "Pulp and paper agitation: the history, mechanics and process". Tappi Press, Atlanta, 35-41.

**Cleveland C.F. (1993):** TAPPI Press, Atlanta, 91-100.

**Grantz D.C. (1984):** *TAPPI Engineering Conference*, Boston, 17-20 September 9-14.

**Fallows J.D. (1996):** *TAPPI Deinking Short Course*, Houston, 10-12 June

**Brouillette F., Daneault C., Dorris G. (2000):** *Conférence Technologique Estivale*, Québec, 7-9 June 87-92.

**Fabry B., Carré B. (2002):** *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 September.

**Pfalzer L. (1983):** *TAPPI Pulping Conference vol.1*, Houston, 24-25 October 139-143.

**Lamort P. (1976):** *Revue ATIP* .30 (2), 56-60.

**Lamort P., Lamort de Gail B. (1980):** *Papier Carton et Cellulose* .29 (4), 60-61.

**Aikawa Y., Kanazawa T. (1982):** *Japan Pulp and Paper* 19 (4), 52-63.

<http://www.voithsulzer.com>

**Nerg H., Pousi J., Hourula I., Juutinen V., Heimonen J. (1999):** *TAPPI Recycling Conference* 3, Atlanta, 1-4 Març 985-999.

**Iwamoto T. (1982):** *Japan TAPPI Journal* 36 (1), 59-64.

**Himanen J. (1995):** *2<sup>nd</sup> International Seminar on Pulp and Paper Industry*, New Delhi, 9-11 December 295-302.

**Momdouh A.B., Koffinke D. (1990):** *Pulp and Paper* 64 (9), 218-219.

**Virëa S.J. (1983):** *TAPPI Pulping Conference vol. 1*, Houston, 24-26 October 155-161.



**Emery G., Cook S. (1998):** *TAPPI Recycling Symposium*, New Orleans, 8-12 March 505-514.

**Lindsay M. (1983):** *TAPPI Pulping Conference* vol. 1, Houston, 24-26 October 151-154.

**Fisher P.C., Shaw G. (2002):** *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 September.

**Müller W. (2000):** *Twogether-Paper Technology Journal*, (2) 18-19.

**Mentz J.R. (1991):** *TAPPI Pulping Conference*.1, Orlando, 3-7 November 83-84.

**Stinson S. (1991):** *Chemical Engineering. News* 69 (1), 22.

**Ruzinsky F., Kokta B.V. (2000):** *Progress in Paper Recycling* 9 (2),30-39.

**Mulligan D.B. (1995):** *Progress in Paper Recycling* 4 (2)12-17.

**Button A.F., Picard K. (2002):** *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 September

**Lafon M-O. (1997):** *50<sup>ème</sup> Congrès ATIP*, Grenoble, 21-24 octobre.

**Ackermann C., Putz H.J., Götsching L. (1997):** *4<sup>th</sup> CPPA Research Forum on Recycling*, Québec, 6-10 oct. 59-66.

**Tremblay E., Sain M.M., Daneault C., Lapointe M. (1998):** *Progress in Paper Recycling* 8 (1), 45-53.

**Harrop N.M., Wiseman N. (1999):** *53<sup>rd</sup> APPITA Conference*. vol.2, Rotorua (New Zealand), 19-23 April. 809-815.

**Fabry B., Roux J-C., Carré B. (2000):** *53<sup>ème</sup> Congrès ATIP*, Bordeaux, 17-19 October.

**Cherbit M., Roux J.C. (2004):** *ATIP* vol 58, n2, 26-33.

### **3. MATERIALS, EQUIPS I METODOLOGIES**

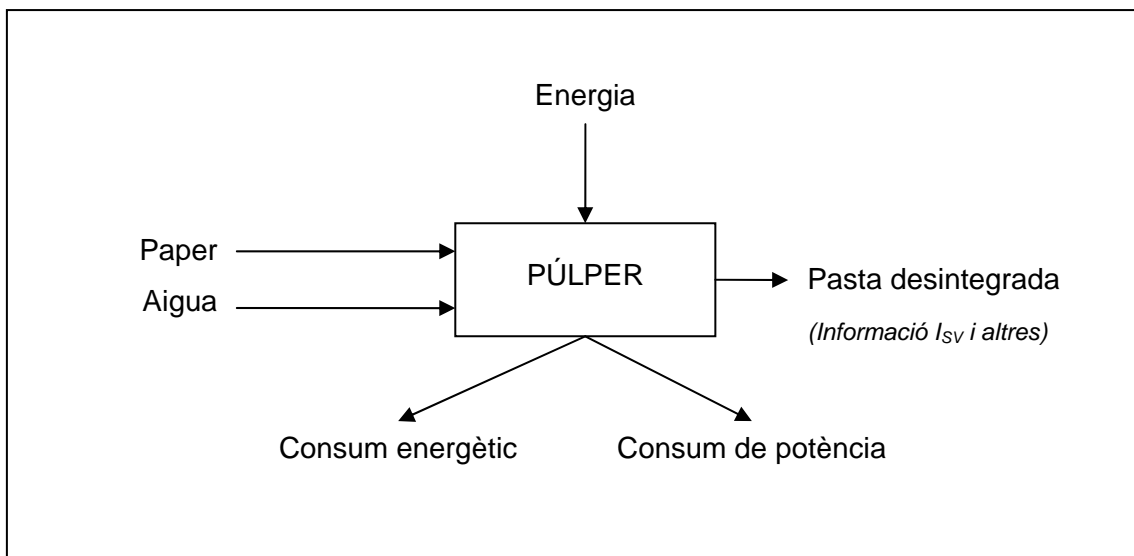


### 3.1. Introducció

En aquest capítol es descriuen els diferents materials i equips utilitzats, així com les metodologies experimentals utilitzades.

El procés de desintegració del paper requereix un desintegrador, per a la posada en suspensió de les fibres cel·lulòsiques, i pel seu estudi en el laboratori s'utilitzen alhora tot un seguit de mesures de les entrades, sortides i consums del procés.

Es descriu la manera com s'han obtingut les dades referents a la desintegració dels tres tipus de papers estudiats. En el diagrama de la figura 3.1.1 es mostren els paràmetres bàsics que intervenen en cada un dels experiments de desintegració.



**Figura 3.1.1:** Paràmetres bàsics que intervenen en un procés de pulpejat.

## 3.2. Materials

El paper és la matèria primera constituïda principalment per matèries cel·lulòsiques: les fibres i els fins. I matèries no cel·lulòsiques com càrregues i tintes d'impressió que formen els anomenats contaminants en el paper sotmès a operacions de reciclatge. Els papers estudiats en aquest cas són:

**PQ** Paper estucat d'Alta Qualitat

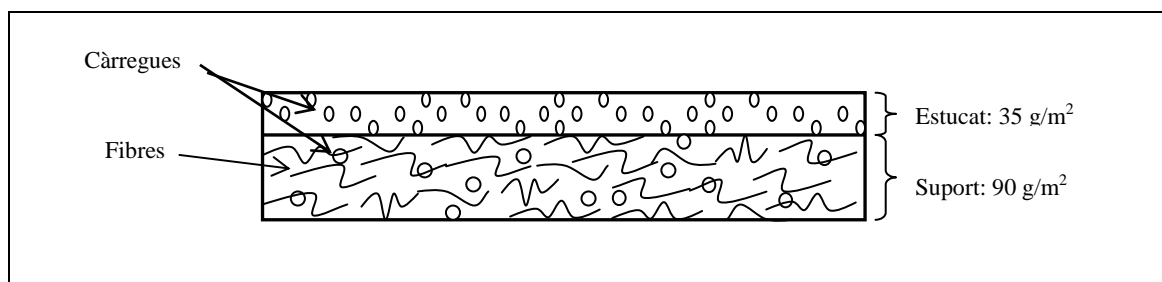
**PR** Paper Revista o "Magazine"

**PF** Paper Fotocòpia

Aquestes mostres de paper son susceptibles de ser reciclades mitjançant un procés selectiu amb la finalitat d'obtenir un paper amb una qualitat comparable a l'original. En aquest apartat es fa una descripció de la matèria primera utilitzades, tenint en compte la seva composició i les característiques físiques.

### 3.2.1. Paper Estucat d'Alta Qualitat (PQ)

El paper estucat d'Alta Qualitat és fabricat per l'empresa ACONDA S.A. ubicada a Flaçà (Gironès). La seva estructura es mostra en la figura 3.2.1



**Figura 3.2.1:** Esquema de l'estructura del paper estucat d'alta qualitat

En la figura 3.2.1 es representa l'esquema del paper designat com PQ, constituït per un suport format per fibres i càrregues i una capa d'estucat composta en major part, per càrregues. La composició d'aquest paper es detalla quantitativament a la taula III.2.1.

**Taula III.2.1:** Composició del paper estucat de qualitat PQ.

Proporció	Component	Descripció
58 %	Pasta d'Eucaliptus de Huelva	100 % fibra curta
	Pasta de residus forestals	87,5 % fibra curta 12,5 % fibra llarga
42 %	Càrrega mineral	35 g/m <sup>2</sup> estucat 20 % en massa

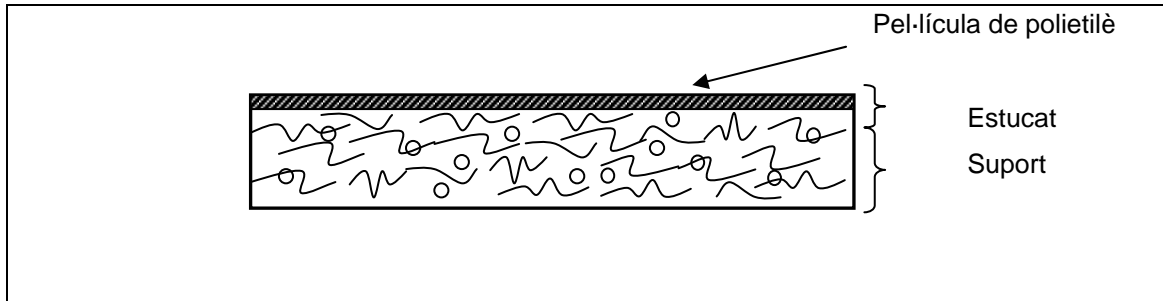
Els 35 g/cm<sup>2</sup> corresponen a la capa d'estucat que hi ha a cada cara. En realitat, la càrrega mineral total és del 42,5%, que engloba la càrrega que hi ha en el paper més la que conté la capa d'estucat. Per tant, el 57,5% és fibra. Llavors dels 127,5 g/m<sup>2</sup>, 36,5 g/m<sup>2</sup> és capa d'estucat, 17,74 g/m<sup>2</sup> és càrrega en massa, 41,75 g/m<sup>2</sup> és fibra d'eucaliptus i el 31,5 g/m<sup>2</sup> és fibra obtinguda de residus agroforestals. Les diferents normatives utilitzades per calcular aquests percentatges són per una banda, la Tappi T 41 om-93 pel càlcul del gramatge expressat en g/m<sup>2</sup> i la Tappi T413 om-93 pel càlcul de la proporció de cendres. Així, el gramatge i proporció de cendres són els que segueixen:

Gramatge	127,5 g/m <sup>2</sup>
Cendres	42,5%

### 3.2.2. Paper Revista o “Magazine” (PR)

El paper Revista està fabricat amb un suport de l'empresa Finlandesa Metsä-Serla Kirknemi Mills. La figura 3.2.2 mostra un esquema de l'estructura de paper PR.

L'embolcall és paper laminat Kraft amb una capa de polietilè de baixa densitat i reciclable i el suport és format per les fibres cel·lulòsiques i càrregues minerals.



**Figura 3.2.2:** Esquema de l'estructura del paper revista

La quantitat de cada component en aquest tipus de paper es detalla en la taula III.2.2 que es mostra a continuació. Les normatives utilitzades pel càlcul del gramatge i la proporció de cendres són les mateixes que les que s'han utilitzat en el paper estucat de qualitat PQ. En aquest cas, el gramatge i la càrrega mineral són aquests:

Gramatge	61 g/m <sup>2</sup>
Cendres	34 %

**Taula III.2.2:** Composició del Paper Revista o "Magazine"

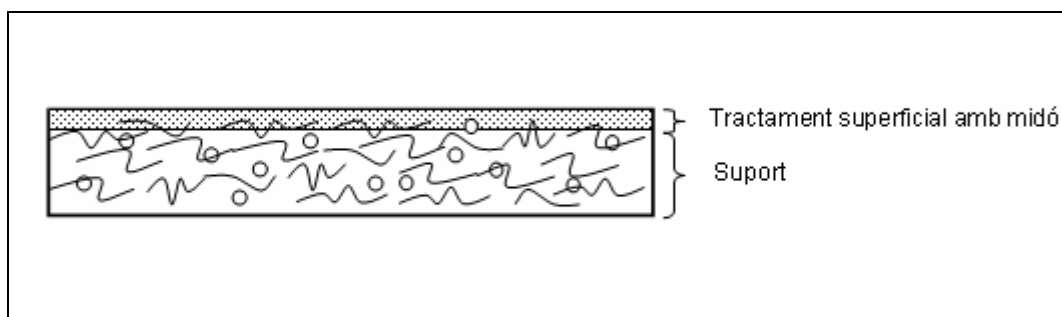
Proporció	Component
26 %	Pasta mecànica
40 %	Pasta kraft química
34 %	Càrrega mineral

#### 3.2.3. Paper Fotocòpia (PF)

El paper per fotocopiadora (PF) ha estat fabricat a l'empresa Plemen S.A. (Riells i Viabrea). Està constituït per una barreja de pasta química i termo-mecànica i amb una

fina capa de midó, que millora les seves propietats superficials i el fan més adequat per a la impressió amb fotocopiadores.

La figura 3.2.3 mostra un esquema de l'estructura del paper PF. La superfície està recoberta per la capa d'estucat procedent d'un tractament superficial amb midó, i el suport és format per les fibres cel·lulòsiques i càrregues minerals. En la taula III.2.3 es detalla la composició d'aquest paper.



**Figura 3.2.3:** Esquema de l'estructura del paper fotocòpia.

**Taula III.2.3:** Composició del paper fotocòpia.

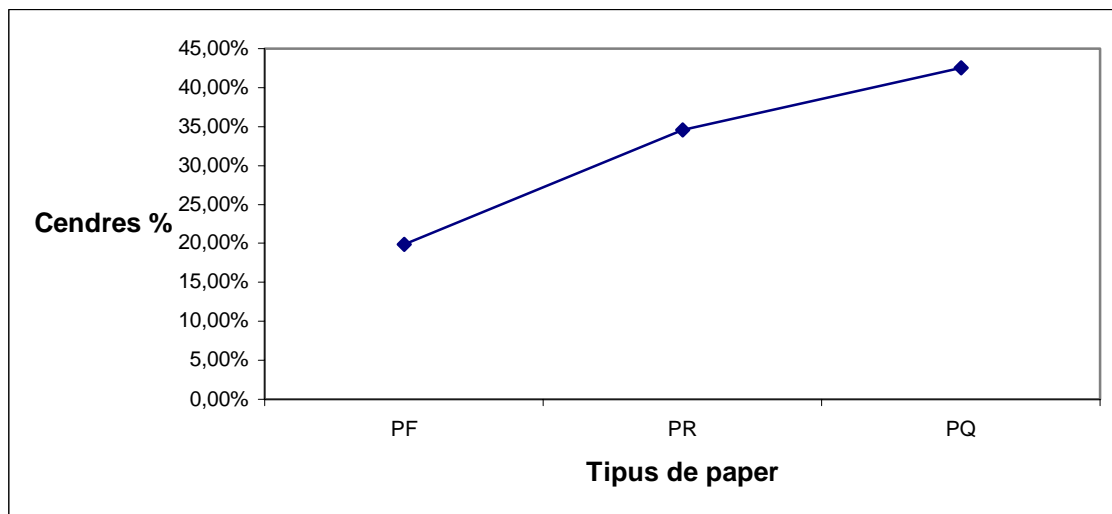
Proporció	Component	Descripció
17 %	Pasta termo-mecànica	8,5% fibra curta 8,5% fibra llarga
68 %	Pasta química (kraft)	55% fibra curta 13% fibra llarga
15 %	Càrrega mineral	5~6 g/m <sup>2</sup> Carbonat de calç

Segons les normatives Tappi T 41 om-93 pel càlcul del gramatge i la Tappi T413 om-93 pel càlcul de la proporció de cendres, el gramatge i proporció de cendres del paper fotocòpia PF són els que s'indiquen a continuació:

Gramatge    80 g/m<sup>2</sup>  
Cendres      19 %



Segons les característiques descrites, el gramatge del paper PQ és més gran que el dels altres, cosa que li confereix una major consistència, i el paper PR és el de gramatge inferior, característica fàcilment observable a simple vista. En quant al contingut en cendres, equivalent a les càrregues minerals, el seu contingut augmenta progressivament des del PF al PQ passant per PR, tal com es pot veure a la gràfica de la figura 3.2.4.



**Figura 3.2.4:** Proporció de cendres o càrrega mineral de PF, PR i PQ.

Els recobriments són completament diferents en els tres casos, en el paper PQ és un recobriment mitjançant una capa d'estucat gruixut amb la finalitat de formar una superfície amb una imprimibilitat d'alta qualitat, el paper PR combina una bona superfície per a la impressió amb resistència a la humitat, gràcies a la capa d'estucat i el recobriment amb polietilè, el paper fotocòpia és adequat per a la impressió per xerografia degut a la seva capa de midó que homogeneïtza la superfície.

## 3.3. EQUIPS

### 3.3.1. La Cel·la Pulcel

El procés de desintegració es du a terme en la cel·la Pulcel, que és una planta pilot de pulpejat de pastes i paperots semiindustrial que està ubicada en els laboratoris del grup Lepamap (figura 3.3.1). Aquesta cel·la està basada en l'estructura d'una cel·la Voith, de 50 L de capacitat i dissenyada per la firma Varein. Està construïda d'acer inoxidable i adquirida a través de la casa Metrotec. És un cel·la dissenyada per ser operativa a les dues etapes del destintatge: per la desintegració de pastes i paperots i per la flotació.

Les condicions utilitzades han estat sempre de 20 l i la temperatura de 50°C.

Els components de la cel·la són:

1. Dipòsit amb un volum útil de fins a 50L per flotació i 30L per la desintegració, amb quatre deflectors laterals instal·lats perpendiculars a les parets separats a una distància equidistant, i una sortida de descàrrega a la part inferior.
2. Alimentació elèctrica principal de 50/60Hz amb un motor de corrent altern trifàsic de 220/440V, 3.7/4.4kW de potència a 1500/1800rpm, i comandaments de posada en marxa (botó verd) i aturada del rotor (botó vermell).
3. Variador de freqüència Tshvert VF-SXN trifàsic de Toshiba, de 1,5 a 7,5 kW de potència.
4. Regulador de velocitat amb un potenciòmetre exterior amb una variació de 0 a 2000 rpm, amb pantalla digital.
5. Analitzador de xarxa ubicat després del variador de velocitat per mesurar els consums energètics.

6. Altres accessoris com són un temporitzador, termòmetre, pHmetre, rotàmetre, amperímetre i tapa de tancament.
7. Rotor helicoidal per treballar a altes consistències i amb rotació en sentit horari. És la turbina emprada a l'etapa de desintegració.
8. Rotor pla per baixes consistències i emprat també a l'etapa de flotació.



**Figura 3.3.1:** Cel·la Pulcel situada als laboratoris del Lepamap

En la figura 3.3.1 es pot veure una vista lateral de la cel·la Pulcel amb una planxa lateral desmuntada, així es pot apreciar el motor, la transmissió (sota el dipòsit) i l'equipament electrònic. A més es pot veure la sortida inferior de fluid a sota del dipòsit. Equipat amb un sistema d'adquisició de dades per mesurar l'energia i la potència.

La regulació de la velocitat del rotor es du a terme mitjançant un potenciòmetre exterior que permet el rang de 0 a 2000 rpm (figura 3.3.2). Situat després del variador de velocitat un analitzador de xarxa mesura els consums energètics i de potència.



**Figura 3.3.2:** Pannell amb accessoris integrats en la cel·la Pulcel.

Els rotors incorporables a la cel·la es mostren en la figura 3.3.3. El rotor helicoidal 3.3.3(a) s'utilitza per treballar a mitjanes consistències en l'etapa de desintegració i el rotor pla 3.3.3(b) s'utilitza per treballar a baixes consistències.



**(a)**

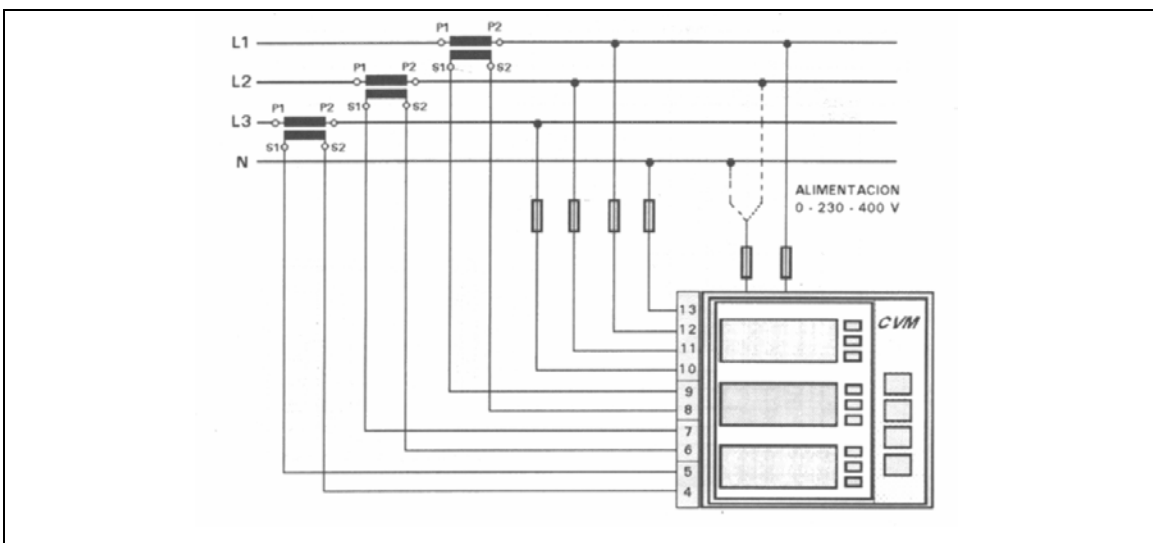


**(b)**

**Figura 3.3.3:** Rotors de la cel·la pulcel. (a) Rotor helicoidal utilitzat en la desintegració, (b) Rotor pla.

### 3.3.2. Analitzador de xarxa circuitor CVMK-4C

L'analitzador de pannel CVMK és un instrument que mesura, calcula i visualitza els principals paràmetres elèctrics en xarxes industrials trifàsiques. La mesura es realitza en valor eficaç real, mitjançant tres entrades de tensió de c.a. i tres entrades d'intensitat c.a. (a través de transformadors de corrent In/5A). A continuació es mostra en la figura 3.3.4 l'esquema de connexió del CVMK en una xarxa trifàsica de baixa tensió:



**Figura 3.3.4:** Esquema de la connexió del CVMK en una xarxa de baixa tensió.

Mitjançant un processador intern permet analitzar simultàniament els paràmetres descrits en la taula III.3.1 que segueix.

Taula III.3.1: Paràmetres mesurables amb l'equip de sèrie de l'analitzador de xarxa CVMK-4C

Paràmetre	L1	L2	L3	Promig	Suma
Tensió simple	X	X	X	X	
Tensió composta	X	X	X	X	
Intensitat	X	X	X	X	
Potència activa	X	X	X		X
Potència Reactiva L	X	X	X		X
Potència Reactiva C	X	X	X		X
Factor de potència	X	X	X	X	
Potència Aparent					X
Freqüència	X				

Apart d'aquestes variables, si l'equip a més té connectat un mòdul d'energia + rellotge, també és possible analitzar les variables que es mostren a la taula III.3.2.

Taula III.3.2: Variables addicionables amb el mòdul d'energia

Variable	CVMK-4C
Data/Hora	TIME
Energia Activa (2 comptadors independents: Energia consumida (+) i Energia generada (-))	kW·h (+) i (-)
Intensitat	kvarh.L (+) i (-)
Potència activa	kvarh.C (+) i (-)

La visualització d'aquests paràmetres elèctrics és possible mitjançant 3 displays numèrics, cada un disposa de tres leds (vermell, verd i groc) que indiquen el paràmetre mostrat en aquell moment. Si en el display es visualitza el led vermell, significa que es mostren els valors de voltatge ( $V_1, V_2, V_3$ : fase per display). Si el led il·luminat és el verd aleshores es visualitzen els valors de la intensitat ( $I_1, I_2, I_3$ ). Per últim si el led és el de color groc, les pantalles mostraran els paràmetres programats per l'usuari.

En el present estudi, es llegeix la mesura del consum d'energia acumulada. L'analitzador de xarxa instal·lat és el es troba integrat en la cel·la Pulcel com es mostra en la figura 3.3.5.



**Figura 3.3.5:** Display de la cel·la Pulcel de l'analitzador de xarxa circuitor CVMK-4C.

### 3.3.3. Aparell Sommerville

L'aparell Sommerville ens permet avaluar el percentatge de paquets fibrosos que romanen en la suspensió en la desintegració (Índex Sommerville). Per tant es determina la fibra no individualitzada a les condicions de pulpejat aplicades.

L'aparell de mesura de l'índex de Sommerville, com es mostra a la figura 3.3.6, d' AB Lorentzen & Wettre, consta d'un tamís metàl·lic que conté una entrada i una sortida d'aigua. La connexió d'aigua al tamís consta d'un conducte amb una vàlvula d'obertura, seguit d'un manòmetre que permet ajustar l'aigua amb precisió i finalment un aspersor cargolat que projecta l'aigua d'entrada en direcció paral·lela al tamís. El tamís metàl·lic està format per 6 fileres de 126 ranures , cadascuna d'elles amb una longitud de 45 mm , 0,15 mm d'amplada i 2 mm de separació. El gruix del tamís és de 0,16 mm. Les dimensions de l'aparell són 450x525x530 mm<sup>3</sup> i té una alçada de 600 mm.



**Figura 3.3.6:** Fotografia de l'aparell Sommerville.

Una excèntrica amb 0,25 CV de potència a 145 rpm i connexió de 50/60 VHz de corrent altern trifàsic provoca un moviment de vaivé en sentit horitzontal que orienta les fibres d'acord amb l'obertura de les ranures. El procediment d'assaig segueix el mètode de treball Tappi UM242.

#### **3.3.4. Suport Informàtic**

La cel·la Pulcel està connectada a un PC, mitjançant una targeta d'adquisició de dades, que permet fer mesures de potència i energia instantània. Totes aquestes mesures queden reflectides en un programa molt simple dissenyat amb Lab Windows, el qual està connectat amb un full de Excel, on es guarden les mesures i permet realitzar operacions matemàtiques.



## 3.4. Metodologies experimentals

### 3.4.1. Càlcul de la humitat relativa

La humitat dels diferents papers es determina segons norma UNE-EN 20287 El procediment consisteix senzillament en assecar durant tres hores a 105°C. Llavors si s'anomena  $W_H$  al pes humit i  $W_S$  al pes sec, llavors la humitat relativa es calcula de la següent manera:

$$H\% = \frac{W_H - W_S}{W_S} \cdot 100 \quad (\text{eq. 3.4.1})$$

### 3.4.2. Càlcul de la consistència o fracció màssica

A continuació s'indica la metodologia seguida per elaborar les diferents suspensions papereres estudiades. El primer pas és pesar la quantitat de paper necessària per realitzar l'assaig. En funció de la consistència i la humitat expressada en tant per cent. El procés de càlcul és el que segueix.

Per obtenir un volum de 20L de suspensió de paper en aigua amb fracció màssica  $X_m$  i amb un contingut en humitat en el paper  $H$  en tant per cent, la quantitat de paper a pesar és  $Y$ , expressada en grams.

$$Y = 20 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot X_m \cdot \frac{100 + H\%}{100} \quad (\text{eq. 3.4.2})$$

Així doncs, si es vol obtenir una suspensió de fracció màssica 0,14 d'un paper amb un 3,5% d'humitat, caldrà pesar 2898 g de paper i afegir-hi 17,102 kg d'aigua calenta (50°C).

### 3.4.3. Càlcul de l'Índex de Sommerville i temps de desintegració

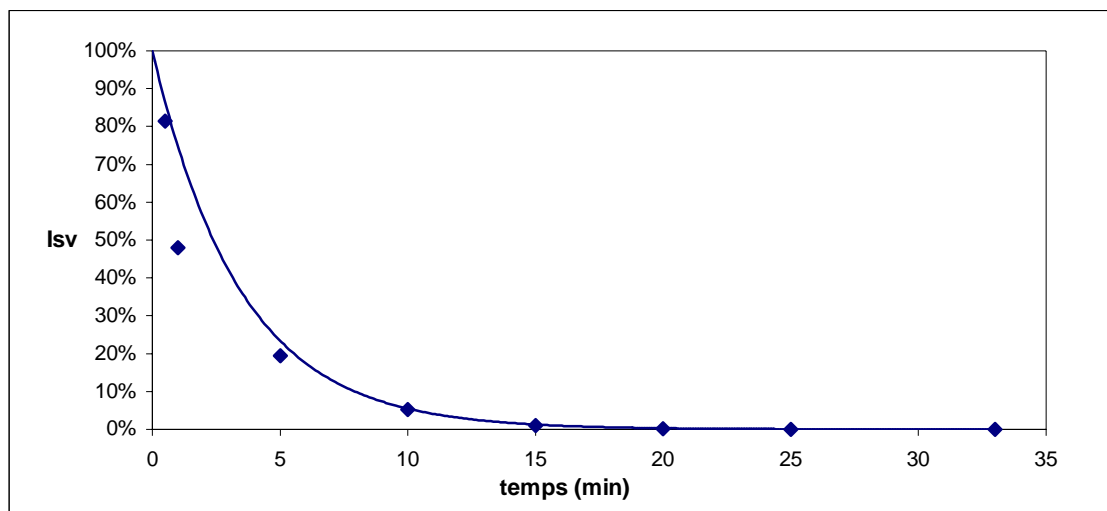
L'aparell Sommerville ens permet determinar el percentatge de paquets fibrosos, o fibra no individualitzada, que romanen en la suspensió. Aquesta mesura caracteritza el procés de desintegració, i per tant caldrà determinar l'evolució de l'Índex de Sommerville al llarg de la desintegració.

El procediment d'assaig segueix el mètode Tappi UM242 que es descriu a continuació:

1. Fixar la caixa tamissadora i el tamís a l'aparell.
2. Connectar la conducció d'aigua a l'aspersor i tancar la caixa tamissadora.
3. Obrir la vàlvula d'entrada d'aigua i ajustar la pressió a 1225 kg/cm<sup>2</sup>.
4. Connectar el motor que acciona l'eix a 690/700 rpm i que origina un moviment horitzontal i orienta les fibres d'acord amb l'obertura de la ranura del tamís.
5. Prendre la mostra que conté el 25g en matèria seca extreta del púlper durant el procés de desintegració de la suspensió i introduir-la a la caixa tamissadora.
6. Parar el motor i tancar la vàlvula d'entrada d'aigua quan hagin passat 20 minuts des de la introducció de les fibres.
7. Treure el tamís i rentar-lo suaument amb aigua procurant no perdre fibres.
8. La suspensió d'aigua-fibra es filtra amb una trompa de fer el buit. El paper de filtre prèviament assecat i tarat que conté les fibres es posa a l'estufa a assecar, per eliminar l'aigua continguda en les mateixes fibres.
9. Pesar la quantitat (x) de fibra filtrada i calcular l'Índex Sommerville com s'indica:

$$\frac{x \text{ g pasta seca}}{25 \text{ g pasta seca}} \cdot 100 = \% \text{Índex Sommerville}$$

Per cada experiment, es pot obtenir una gràfica com la figura 3.4.1, on es visualitza l'evolució de la individualització de les fibres en el procés de desintegració.



**Figura 3.4.1:** Índex Sommerville vs temps (min).

El temps de desintegració dels experiments es pren en base a obtenir un índex de Sommerville òptim. Les noves tendències a Europa en quant a aquest valor òptim de desintegració és un 1% d'Índex Sommerville utilitzant una ranura de 0,075 mm d'amplada. En el nostre cas, al disposar d'una amplada de ranura de 0,15mm es restringeix el valor òptim fins un valor igual o inferior al 0,01% d'Índex Sommerville

### 3.4.4. Caracterització reològica del púlper

En aquest apartat es descriu la metodologia seguida en l'experimentació i càlculs per a la caracterització reològica del púlper amb glicerina i les seves dissolucions com a fluid newtonià.

Per a dur a terme aquesta caracterització és van utilitzar dos tipus de rotors. Per una banda, el rotor helicoidal amb una major àrea d'arrossegament i que s'utilitza per desintegrar suspensions cel·lulòsiques d'alta consistència i per l'altra banda, el rotor pla, utilitzat principalment a baixes revolucions i consistències baixes.

#### **3.4.4.1. Preparació de les dissolucions de glicerina**

L'agitació de la glicerina es realitza en la cel·la Pulcel, amb el rotor helicoïdal. Les dissolucions de glicerina utilitzades (100, 95, 90, 85, 80, 60 40 i 20%) es preparen afegint el volum d'aigua corresponent a la dissolució anterior o sigui, s'ha començat per la del 100%, un cop experimentada aquesta concentració es dilueix amb aigua per obtenir una concentració de 95%. Llavors un cop experimentada la de 95% s'afegeix el volum d'aigua necessari per obtenir una dissolució al 90%, i així successivament. L'operació de dilució es realitza en un dipòsit separat del dipòsit del púlper, realitzant tots els assaigs amb 20 litres i a 25°C.

Les mesures energètiques s'han fet mitjançant l'analitzador de xarxa Circuitor CVMK-4C incorporat al taulell de control del desintegrador, permetent conèixer l'energia consumida durant l'agitació i el sistema d'adquisició de dades la potència bruta consumida.

#### **3.4.4.2. Determinació del pes específic de les dissolucions de glicerina**

El pes específic és la relació entre el pes a l'aire d'un cert volum de sòlids a una temperatura donada i el pes a l'aire del mateix volum d'aigua destil·lada, a la mateixa temperatura. Per la seva determinació s'ha utilitzat un picnòmetre a la temperatura de 25°C.

#### **3.4.4.3. Determinació de la viscositat de les dissolucions de glicerina**

La viscositat dinàmica de les dissolucions de glicerina i aigua s'ha determinat a 25°C mitjançant un viscosímetre Optilas.

#### **3.4.4.4. Determinació de la potència bruta i energia consumida**

Una vegada introduït el volum de glicerina en el dipòsit del púlper, es selecciona la velocitat de treball mitjançant el potenciòmetre del quadre de comandaments i es visualitza en el display corresponent les unitats de revolucions per minut. Seguidament, es comprova la temperatura de la dissolució de glicerina, la qual ha de

ser sempre la 25°C abans d'iniciar l'experiment. Si és superior a aquesta temperatura, la dissolució es buida en un dipòsit de refrigeració que absorbirà la calor acumulada per la glicerina i provocada per l'agitació que ha sofert en l'experiment anterior. Si la temperatura és inferior, s'agita dins el dipòsit del púlper per tal de produir escalfament. Quan arribi a 25°C, es tornarà a traslladar al dipòsit del púlper si la glicerina ha necessitat ser refrigerada. Per tant, cal mesurar la temperatura abans i després de cada experiment.

Un vegada assegurats la temperatura i la velocitat de treball corresponent, i amb el programa d'adquisició de dades a punt, es posa en funcionament el púlper, i controlant el temps amb un cronòmetre, es deixa que el fluid estigui en agitació durant dos minuts. Després d'aquests dos minuts s'atura primer el púlper i després el sistema de mesura informàtic.

A continuació, les dades mesurades de potència, es promitgen i s'obté la potència mitjana consumida per aquell règim seleccionat de velocitat a 25°C. També s'anoten les energies que indica el display del quadre de comandaments en el temps inicial i final de l'experiment.

Els resultats queden reflectits per cada concentració de glicerina, tal com mostra l'exemple de la taula III.4.1.

**Taula III.4.1:** Mesures de potència, energia i temperatura en un experiment

<b>n (rpm)</b>	<b>E<sub>0</sub> (kWh)</b>	<b>E<sub>2min</sub> (kWh)</b>	<b>T<sub>0</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>2min</sub> (°C)</b>	<b>P<sub>b,2min</sub> (W)</b>
700	2.228	2.247	25	25.3	545.52

A on ;

- E<sub>0</sub>** Energia acumulada abans d'iniciar l'experiment [kWh]
- E<sub>2min</sub>** Energia acumulada després dels dos minuts d'experiment [kWh]
- T<sub>0</sub>** Temperatura inicial abans d'iniciar l'experiment [°C]
- T<sub>2min</sub>** Temperatura final després dels dos minuts d'experiment [kWh]
- P<sub>b,2min</sub>** Potència bruta consumida després dels dos minuts d'experiment [W]

Amb les concentracions de glicerina experimentades els règims de velocitat experimentats han estat de 200 a 2000 rpm, amb increments de 50 rpm de 0 a 400 rpm, i un increment de 100 rpm de 400 a 2000 rpm.

#### 3.4.4.5. Determinació de la potència al buit i diàmetre del rotor helicoidal

Les potències que mesura el sistema d'adquisició de dades s'anomenen potències brutes, ja que es poden dividir en la suma de dues potències: la potència per fer girar la massa del rotor i la potència per agitar el volum de fluid. No obstant, el que interessa per realitzar els càlculs és només la potència neta, o potència necessària per agitar el fluid.

Per tant, seguint la mateixa metodologia, es mesura la potència en buit (sense cap fluid en el dipòsit) que consumeix el púlper, o sigui, només la potència necessària per fer girar la massa del rotor per tots els règims de velocitats experimentats amb dissolucions de glicerina. S'observa en la figura 3.4.2 per rotor helicoidal, que el consum de potència en buit és lineal amb la velocitat de rotació.

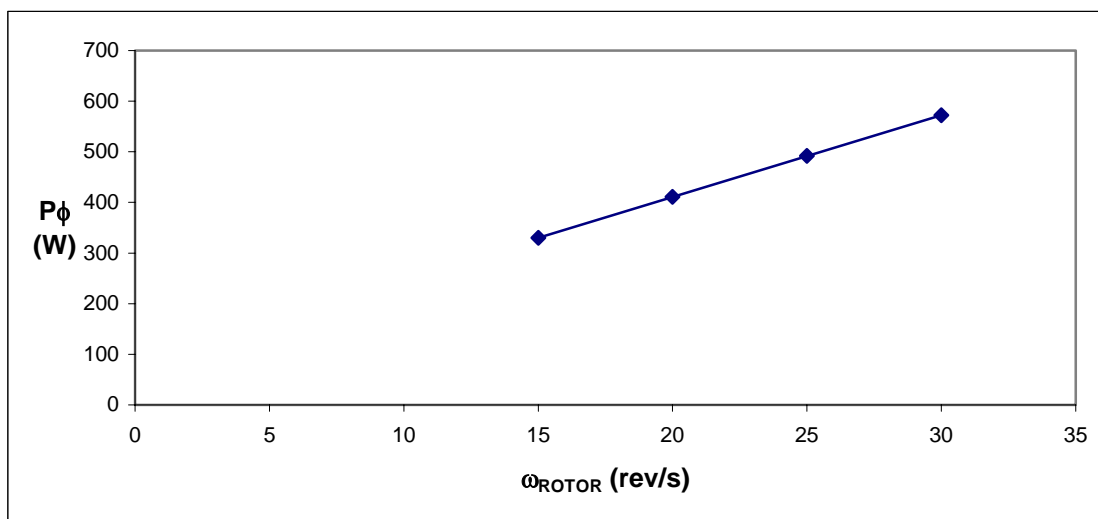


Figura 3.4.2: Potència al buit  $P_{\phi}$  en funció de la velocitat per rotor helicoidal.

Atès que es va decidir realitzar l'estudi a dues velocitats d'agitació 19 i 26 rev/s, el valor de la potència al buit a aquestes dues velocitats és:

$$P_{\phi}^{19 r/s} = 395 W$$

$$P_{\phi}^{26 r/s} = 508 W$$

El rotor helicoidal té una geometria complexa com mostrava la figura 3.3.3(a), i presenta diàmetres diferents per cada alçada al llarg de la seva geometria. Per tant, s'ha calculat un diàmetre mitjà que sigui representatiu de tota la geometria, com es pot veure en la taula III.4.2 els diàmetres en funció de l'alçada.

Taula III.4.2: Diàmetres en funció de l'alçada del rotor helicoidal

D <sub>i</sub> (cm)	h <sub>i</sub> (cm)	D <sub>i</sub> ·h <sub>i</sub> /h <sub>TOTAL</sub> (cm)
12,2	2,0	6,67
12,2~15,2	13,6	8,87
26,2	5,4	1,16
	21	16,76
	h <sub>TOTAL</sub>	D <sub>MITJÀ</sub>

A on;

D <sub>i</sub>	Diàmetre
h <sub>i</sub>	Alçada
h <sub>TOTAL</sub>	Alçada total, en el nostre cas és de 21 cm

#### 3.4.4.6. Determinació de la potència neta

La potència neta consumida a 25°C per agitar la dissolució de glicerina en wats (W), s'obté restant de la potència bruta mitjana que mesura el sistema informàtic d'adquisició de dades (apartat 3.3.4), la potència en buit per una determinada velocitat del rotor, definida en l'apartat 3.4.4.5. Per tant, l'expressió que defineix la potència neta és la que segueix:

$$P_{\text{neta}} = P_{\text{bruta}} - P_{\text{buit}} \quad (\text{eq.3.4.3})$$

### 3.4.4.7. Càlcul del números de potència ( $N_p$ ), Reynolds ( $Re$ ) i Froude ( $Fr$ )

Les expressions que defineixen el número de potència, de Reynolds i de Froude s'indiquen a continuació:

$$N_p = \frac{P_n}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} \quad (\text{eq.3.4.4})$$

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu} \quad (\text{eq. 3.4.5})$$

$$Fr = \frac{d \cdot n^2}{g} \quad (\text{eq.3.4.6})$$

A on ;

$P_n$	Potència neta mitjana a 25°C [W]
$\rho$	Pes específic del fluid a 25°C [kg/m <sup>3</sup> ]
$n$	Velocitat de l'agitador [rev/s]
$d$	Diàmetre equivalent del rotor [m]
$\mu$	Viscositat dinàmica del fluid a 25°C [Pa·s]
$g$	Acceleració de la gravetat [m·s <sup>-2</sup> ]

En el cas d'una dissolució al 80% de glicerina, els valors del pes específic i de la viscositat estan tabulats a la temperatura de 25° C, aquests es reflexen a la taula III.4.3. Comprovats experimentalment en els materials utilitzats, els valors han coincidit amb els tabulats.

La potència neta consumida a 25°C per agitar la dissolució de glicerina en W, s'obté restant de la potència bruta mitjana que mesura el sistema informàtic d'adquisició de dades, la potència en buit per una determinada velocitat del rotor.

A continuació, la taula III.4.3 mostra un exemple de càlcul de  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  per una concentració de glicerina al 80% i rotor helicoidal.



Taula III.4.3: Càlcul de  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  per 80 % de glicerina i rotor helicoidal de diàmetre 0,1676m, temperatura 25°C, volum 20L.

n (rpm)	v (Hz)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Pa·s)	Pn (W)	$N_p$	Re	Fr
200	3,33	1205,4500	0,0459	31,913	5,405	2459,03	0,190
300	5,00	1205,4500	0,0459	50,143	2,516	3688,54	0,428
400	6,67	1205,4500	0,0459	68,373	1,448	4918,05	0,760
500	8,33	1205,4500	0,0459	86,603	0,939	6147,57	1,188
700	11,67	1205,4500	0,0459	105,065	0,415	8606,59	2,328
800	13,33	1205,4500	0,0459	136,333	0,361	9836,11	3,040
900	15,00	1205,4500	0,0459	177,898	0,331	11065,62	3,848
1000	16,67	1205,4500	0,0459	234,043	0,317	12295,13	4,751
1100	18,33	1205,4500	0,0459	291,108	0,296	13524,65	5,748
1200	20,00	1205,4500	0,0459	371,618	0,291	14754,16	6,841
1300	21,67	1205,4500	0,0459	421,284	0,260	15983,68	8,028
1400	23,33	1205,4500	0,0459	516,277	0,255	17213,19	9,311
1500	25,00	1205,4500	0,0459	565,11	0,227	18442,70	10,689
1600	26,67	1205,4500	0,0459	670,89	0,222	19672,22	12,161
1700	28,33	1205,4500	0,0459	650,34	0,179	20901,73	13,729
1800	30,00	1205,4500	0,0459	826,05	0,192	22131,24	15,392
1900	31,67	1205,4500	0,0459	874,11	0,173	23360,76	17,150
2000	33,33	1205,4500	0,0459	956,12	0,162	24590,27	19,002

Per tant, s'obtenen els  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  que caracteritzen el púlper per cada règim de velocitats entre 200 i 2000 rpm per cada una de les concentracions de dissolució de glicerina experimentades.

Si es realitza el mateix càlcul amb un rotor pla s'obtenen els resultats que es mostren a la taula III.4.4.

Taula III.4.4: Càlcul de  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  per 80 % de glicerina i rotor pla de diàmetre 0,175m, temperatura 25°C, volum 20L.

n (rpm)	$\nu$ (Hz)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Pa·s)	$P_n$ (W)	$N_p$	$Re$	$Fr$
200	3,33	1209,42	0,034	8,5000	1,156	3631,000	0,198
300	5,00	1209,42	0,034	12,7500	0,514	5447,000	0,446
400	6,67	1209,42	0,034	17,0000	0,289	7262,000	0,794
500	8,33	1209,42	0,034	47,6700	0,240	10893,000	1,786
700	11,67	1209,42	0,034	62,9600	0,200	12708,000	2,431
800	13,33	1209,42	0,034	98,7900	0,210	14522,000	3,175
900	15,00	1209,42	0,034	110,3600	0,165	16335,000	4,018
1000	16,67	1209,42	0,034	133,7600	0,146	18150,000	4,960
1100	18,33	1209,42	0,034	173,9500	0,142	19965,000	6,002
1200	20,00	1209,42	0,034	192,7600	0,121	21780,000	7,143
1300	21,67	1209,42	0,034	230,1000	0,114	23595,000	8,383
1400	23,33	1209,42	0,034	300,4300	0,119	25410,000	9,722
1500	25,00	1209,42	0,034	316,0700	0,102	27225,000	11,161
1600	26,67	1209,42	0,034	352,0200	0,094	29040,000	12,698
1700	28,33	1209,42	0,034	387,9700	0,086	30855,000	14,335
1800	30,00	1209,42	0,034	423,9200	0,079	32670,000	16,071
1900	31,67	1209,42	0,034	459,8700	0,073	34485,000	17,907
2000	33,33	1209,42	0,034	495,8200	0,067	36300,000	19,841

La figura 3.4.3 mostra l'evolució de  $N_p$  en funció de  $Re$ , que s'ajusta a un model potencial amb un coeficient de correlació de 0.99. Es verifica el model de Metzner i Otto de caracterització d'agitadors amb un fluid newtonià.

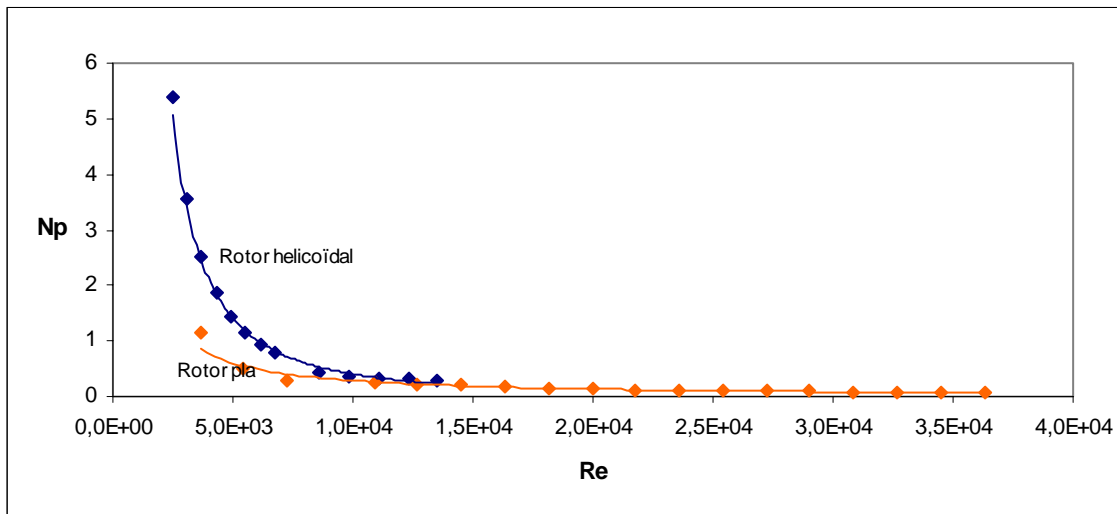


Figura 3.4.3: Np-Re per una C=80% de glicerina, rotor helicoidal n=200 a 1000 rpm.

### 3.4.4.8. Obtenció de les famílies de corbes Np-Re que caracteritzen el púlper per un volum i un rotor fixats

S'agrupen totes les corbes característiques de les dissolucions de glicerina corresponents a un volum i un rotor fixat, obtenint una família de corbes que caracteritzen el comportament del púlper i que segueixen un model potencial molt exacte. Aquest gràfic es representa a escala logarítmica, perquè es pot apreciar millor l'evolució de Np i Re, com es pot veure en la figura 3.4.4.

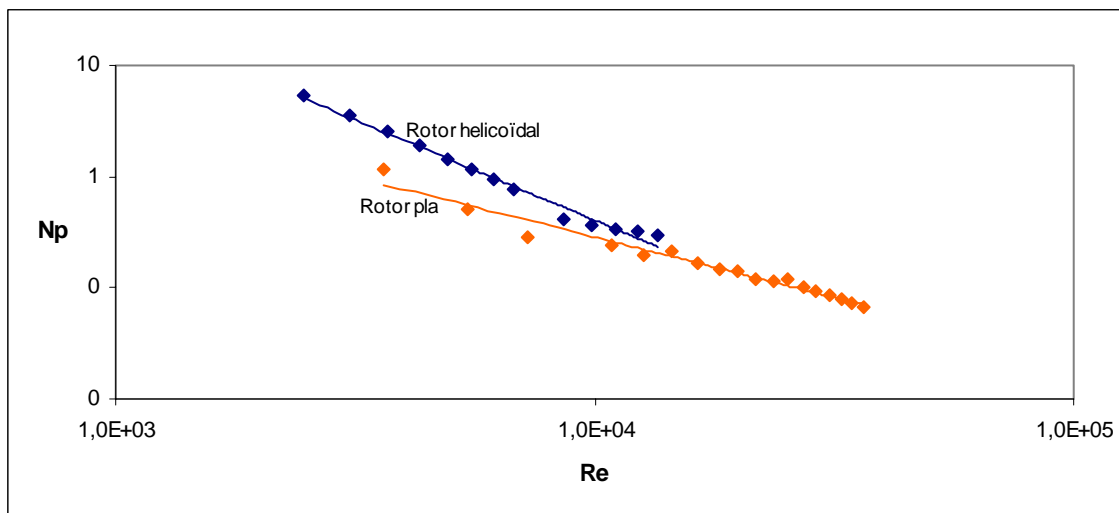


Figura 3.4.4: Np-Re representat en escala logarítmica per una gamma de concentracions.

### 3.4.4.9. Càlcul dels paràmetres $k$ , $x$ i $y$ que caracteritzen el púlper reològicament per un rotor i un volum fixats

Un cop obtingut els  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  per cada dissolució de glicerina i tipus de rotor es pot obtenir l'expressió següent:

$$N_p = k \cdot Re^x \cdot Fr^y, \quad (\text{eq. 3.4.7})$$

Cal una regressió multilinear de dues variables. A partir dels valors de  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  corresponents a les concentracions assajades, s'obté com a resultat els paràmetres de  $k$ ,  $x$  i  $y$  que caracteritza el púlper en funció de la geometria del sistema, la velocitat del rotor, el diàmetre del rotor i propietats físiques del fluid i la gravetat. La regressió es realitza pel procediment que segueix segons el programa informàtic MINITAB:

$$\begin{aligned} (1) \quad N_p &= K \cdot Re^x \cdot Fr^y \\ &\downarrow \\ (2) \quad \ln(N_p) &= \ln(K) + x \cdot \ln(Re) + y \cdot \ln(Fr) \\ &\downarrow \\ (3) \quad y &= a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 \end{aligned}$$

Aquesta és la solució que dona el programa: els coeficients  $a$ ,  $b$  i  $c$ . A on  $k = e^a$ ,  $x = b$  i  $y = c$

A més de donar un coeficient de correlació ( $r^2$ ) i un error estàndard (StErr). El coeficient de correlació indica en quin tant per 1, les dades inicials:  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  s'ajusten al model trobat, i l'error estàndard indica l'error que es comet en obtenir un valor utilitzant el model. Per tant, interessa obtenir un coeficient de correlació el més elevat possible i un error estàndard el més baix possible.

La resolució del model per a cada rotor permet conèixer  $k$ ,  $x$  i  $y$  i per tant, s'obté una expressió de la viscositat ( $\mu$ ) que depèn de la potència neta, el pes específic de la dissolució i la velocitat d'agitació d'aquesta, per un interval de potències i tipus de rotor.

Substituint en el model l'expressió de cada un dels nombres adimensionals, permet relacionar les variables de treball. L'expressió que s'obté és:

$$\frac{P_n}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} = k \left( \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu} \right)^x \cdot \left( \frac{d \cdot n^2}{g} \right)^y \quad (\text{eq.3.4.8})$$

Aïllant la viscositat, s'obté:

$$\mu = P_n^{-1/x} \cdot \rho^{(1+x)/x} \cdot n^{(3+x+2y)/x} \cdot d^{(5+2x+y)/x} \cdot k^{1/x} \cdot g^{-y/x} \quad (\text{eq.3.4.9})$$

$$\mu = K \cdot P_n^\alpha \cdot \rho^\beta \cdot n^\gamma \quad (\text{eq.3.4.10})$$

A on;

$$\alpha = -1/x$$

$$\beta = (1+x)/x$$

$$\gamma = (3+x+2y)/x$$

$$K = d^{(5+2x+y)/x} \cdot k^{1/x} \cdot g^{-y/x}$$

Quan es treballa amb suspensions cel·lulòsiques, el terme  $\mu$  de viscositat, o  $\mu_a$  de viscositat aparent se substitueixen per un terme més generalista anomenat factor de cisallament  $\lambda$ , que representa les forces que intervenen en el desfibrat: viscositat, acceleració i impacte, en Pa·s. Per tant, l'expressió de  $\mu$  queda modificada de la següent manera:

$$\lambda = K \cdot P_n^\alpha \cdot \rho^\beta \cdot n^\gamma \quad (\text{eq. 3.4.11})$$

A on:  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  són conegudes, tal com es detalla en el apartat 3.4.4.10 que es mostra tot seguit.

Aquesta expressió és vàlida per matèries cel·lulòsiques i aplicable en el marge de potències consumides amb glicerina que correspon als valors que han intervingut en l'obtenció del model de Metzner-Otto.

#### 3.4.4.10. Càlcul del factor de cisallament ( $\lambda$ ) per una suspensió de paperot

Coneguda l'expressió general del model, que relaciona el factor de cisallament amb la potència, el pes específic i la velocitat, que es mostra a l'equació 3.4.11.

mitjançant el mètode descrit,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i  $k$  són valors coneguts i propis del sistema d'agitació en les condicions estudiades.

Per a cada suspensió, paperot i condicions de velocitat del rotor, podem conèixer  $\rho$ ,  $n$  i  $P_n$  calculada a partir de  $P_b$ . Substituint els valors corresponents a cada cas, podem calcular el factor de cisallament  $\lambda$ .

#### 3.4.4.11. Determinació del pes específic de les suspensions papereres

Pel càlcul del pes específic d'una suspensió paperera, únicament cal que ens fixem en les espècies que intervenen, per així quantificar-lo a partir del pes específic i la proporció d'aquestes.

Dins d'una suspensió paperera es poden tenir principalment tres components: fibres de cel·lulosa, càrrega mineral o cendres i aigua. Els pesos específics d'aquests constituents és el que s'indica a la taula III.4.5.

**Taula III.4.5:** Pesos específics dels principals constituents de les suspensions papereres a 25 °C.

Component	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Cel·lulosa	1500
Cendres	2600
Aigua	1000

La proporció d'aquests components canvia depenent del tipus de paper estudiat, en el nostre cas els percentatges de cada constituent es mostraven a les taules III.1 pel paper estucat de qualitat PQ, a la taula III.2 pel paper revista PR i a la taula III.3 pel paper fotocopia PF. Per fer més entenedor el procés de càlcul del pes específic de les suspensions papereres la taula III.4.6 recull tots aquests valors.

Taula III.4.6: Composició del PQ, PR i PF.

Tipus de paper	Cendres %	Cel·lulosa % <sup>(1)</sup>
PQ	42%	58%
PR	34%	66%
PF	19%	85%

A continuació és posa un exemple del càlcul d'una suspensió al 6% de consistència pastosa de paper estucat de qualitat PQ. Treballant amb una fracció màssica del 0,06 i 20L de suspensió, s'introdueix una massa de 1200 g de paper. Sabent que d'aquest paper un 42% és càrrega mineral o cendres, tindrem 504 g de cendres i 696 g de cel·lulosa. Per tant, coneixent els pesos específics de totes les espècies que hi intervenen (taula III.4.5), es pot conèixer fàcilment el pes específic de la suspensió. En aquest cas és aquest:

$$\rho_{SUSPENSIO} = \rho_{CEL\text{-}LULOSA} \cdot (X_m - X_m \cdot c) + \rho_{CENDRES} \cdot (X_m \cdot c) + \rho_{AIGUA} \cdot (1 - X_m) \quad (\text{eq. 3.4.12})$$

A on;

$\rho_{SUSPENSIO}$	Pes específic de la suspensió (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{CEL\text{-}LULOSA}$	Pes específic de la cel·lulosa a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{CENDRES}$	Pes específic de la càrrega mineral a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{AIGUA}$	Pes específic de l'aigua a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )
$X_m$	Fracció màssica de pasta
$c$	Tan per 1 de cendres

En el cas d'aquest exemple, el pes específic de la suspensió es de 1027,95 kg/m<sup>3</sup> i s'ha calculat de la següent manera:

$$\rho_{SUSPENSIO} = 1500 \cdot (0,06 - 0,06 \cdot 0,42) + 2600 \cdot (0,06 \cdot 0,42) + 1000 \cdot (1 - 0,06) = 1027,95 \text{ kg} / \text{m}^3$$

(eq. 3.4.13)

<sup>(1)</sup> Cal remarcar que cada tipus de paper posseeix la cel·lulosa de pasta de diferent procedència.

## **4. RESULTATS I DISCUSSIÓ**





## 4.1. Introducció

Aquest capítol conté la totalitat de la part experimental de la Tesi. Es divideix en cinc apartats en els que s'aborden els aspectes de la desintegració de paperot estudiats.

Així **l'apartat 4.2** es dedica a l'estudi i importància del temps de desintegració necessari per assolir un nivell de desintegració determinat, mesurat mitjançant l'índex de Sommerville i per a diferents consistències o fraccions màssiques .

L'**apartat 4.3** és un estudi molt desglossat dels aspectes energètics de la desintegració. Igual que el 4.2 s'estudia la incidència de la consistència o fracció màssica sobre el consum d'energia, energia transferida a la suspensió...

En **l'apartat 4.4**, encara que la temàtica no ha estat objecte d'experimentació específica, es comparen els resultats obtinguts en el 4.2 i 4.3 amb les expressions més significatives de la viscositat aparent i potència de fluidització de suspensions fibroses.

En **l'apartat 4.5** es fa un estudi reològic del púlper utilitzant l'anàlisi dimensional i s'obtenen els gràfics de caracterització del púlper amb rotor helicoïdal i amb rotor pla.

A partir dels paràmetres adimensionals del sistema de pulpejat, en **l'apartat 4.6**, es calcula el factor de cisallament de les suspensions en les condicions de treball utilitzades. Finalment s'estudia les correlacions observades entre el factor de cisallament i els altres paràmetres de la desintegració.

## 4.2. Anàlisi del temps de desintegració

En el present apartat s'analitzen els temps de desintegració ( $t_D$ ) dels diferents tipus de paper estudiats: paper estucat d'alta qualitat (PQ), paper fotocòpia (PF) i paper revista (PR), per tal de valorar la influència de la fracció massica de la suspensió ( $X_m$ )<sup>(1)</sup> i la velocitat del rotor del púlper ( $\omega_{\text{ROTOR}}$ ) sobre el temps de desintegració d'aquests.

La taula IV.2.1, mostra els temps de desintegració de cada tipus de paper estudiat. Aquests temps són els necessaris per assolir l'objectiu de desfibratge, mesurat mitjançant l'Índex de Sommerville, amb el valor màxim de 0,01% que equival a 100 mg de paper no desfibrat per cada kg de paperot.

Taula IV.2.1: Temps de desintegració en minuts ( $t_D$ ) per assolir un  $I_{SV}$  màxim del 0,01%.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	$X_m$						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	33	15,5	8	6,3	4,5	3,3	2,6
	26 rev/s	10	6,5	4,5	4	3,2	2,7	2,3
PF	19 rev/s	14	7	4	3	2,5	-	-
	26 rev/s	11	5	3	2,4	2	-	-
PR	19 rev/s	50	27	14	13	12	-	-
	26 rev/s	22	14	9	8	7	-	-

Una primera qüestió que crida l'atenció és que únicament s'ha pogut determinar els temps de desintegració per fraccions massiques superiors a 0,14 en el cas de PQ. En el cas dels papers PR i PF, ha sigut impossible determinar aquest paràmetre ja que les característiques reològiques de la pasta no la fan adequada per a ser desintegrada en

<sup>(1)</sup> La fracció massica ( $X_m$ ) s'obté de la consistència, terme utilitzat industrialment, segons l'expressió que segueix. Per un 6 % de consistència tenim la següent  $X_m$ :

$$\frac{6 \text{ g de sòlid}}{100 \text{ g de suspensió}} = \frac{0,006 \text{ kg de sòlid}}{0,1 \text{ kg de suspensió}} = 0,06 = X_m$$

el púlper utilitzat a fraccions màssiques superiors a 0,14. Aclarida aquesta qüestió, es pot observar primerament que els temps de desintegració, independentment de la velocitat d'agitació del púlper, es redueixen notablement a mesura que augmenta la fracció màssica de la suspensió fibrosa.

Per altra banda, les variacions de consistència juntament amb les de velocitat del rotor comporten temps de desintegració realment molt diferents sobretot quan es comparen a fraccions màssiques extremes. Així, per un mateix objectiu de desintegració a 19 rev/s passem de 33 minuts al 0,06, a 2.6 minuts al 0,18 de fracció màssica en el cas del paper PQ. Aquesta diferència encara és més acusada en el cas del paper PR.

Si s'estudia el quocient entre el  $t_D$  a 19 rev/s i el  $t_D$  a 26 rev/s a les fraccions màssiques més baixes (0,06 g sòlid/g de suspensió) es pot constatar que el  $t_D$  per una agitació de 26 rev/s és 3,3 vegades inferiors que el  $t_D$  de 19 rev/s, pel PQ, 1,3 vegades pel PF i 2,3 vegades pel PR.

Aquesta diferència entre els temps de desintegració a 19 rev/s i 26 rev/s, disminueix de manera considerable en augmentar la fracció màssica de la suspensió. En aquest cas, si s'estudia una altra vegada el quocient entre el  $t_D$  a 19 rev/s i el  $t_D$  a 26 rev/s, però ara a la màxima concentració màssica permesa pel púlper (0,18 per PQ i 0,14 per PF i PR), es pot veure que els quocients s'han reduït d'una manera considerable: 1,3 pel PQ, 1,3 pel PF i 1,7 pel PR. Quedant palès d'aquesta manera que el quocient entre els temps de desintegració a les dues velocitats de rotació estudiades disminueix a mesura que augmenta la fracció màssica.

Per tant es pot dir, que el paràmetre velocitat del rotor és molt important a baixes consistències i no tant a mitjanes i altes consistències, tal i com es reflexa a la gràfica de la figura 4.2.1, per PQ i PR a 19 i 26 rev/s.

Els púlpers industrials no solen tenir, habitualment, capacitat per variar la velocitat del rotor. No obstant, aquesta velocitat és un paràmetre important donat que passant de 19 rev/s a 26 rev/s hi ha una reducció més o menys important depenent de la fracció màssica de treball.

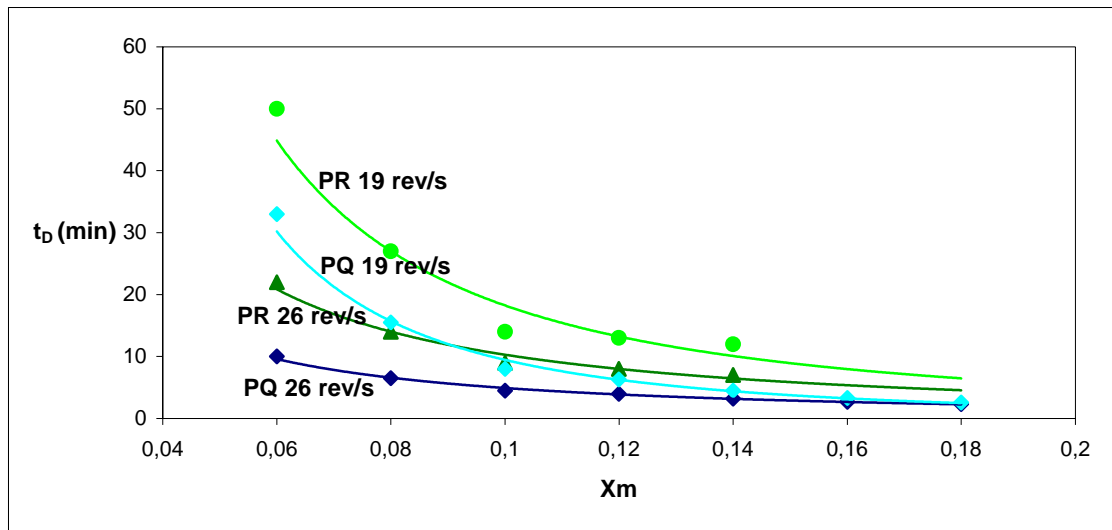


Figura 4.2.1: Temps de desintegració del PQ i PR a 19 rev/s i 26 rev/s.

El comportament dels tres papers estudiats en el pulpejat, es mostra a les gràfiques de la figures 4.2.2 i 4.2.3, a on es representen els resultats de la taula IV.2.1. Aquests, reflecteixen les evolucions dels temps de desintegració en funció de la fracció massica per velocitats de rotació de les parts mòbils del púlper de 19 rev/s (figura 4.2.2) i de 26 rev/s (figura 4.2.3).

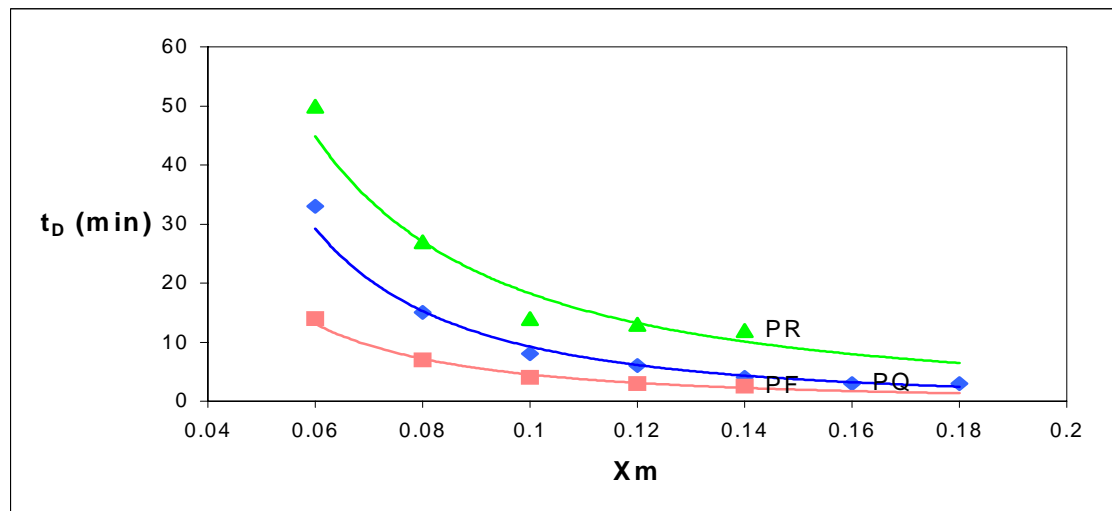


Figura 4.2.2: Temps de desintegració de cada paper en funció de la fracció massica a 19 rev/s.

El comportament dels tres papers segueix tendències similars, però és important destacar que els temps de desintegració són majors quan desintegrem el paper a una velocitat menor, com es mostrava a la gràfica de la figura 4.2.1. Tant a 19 rev/s com a 26 rev/s el temps de desintegració de cada paper i a cada fracció massica presenta el mateix comportament és a dir:

$$t_D^{PR} > t_D^{PQ} > t_D^{PF}$$

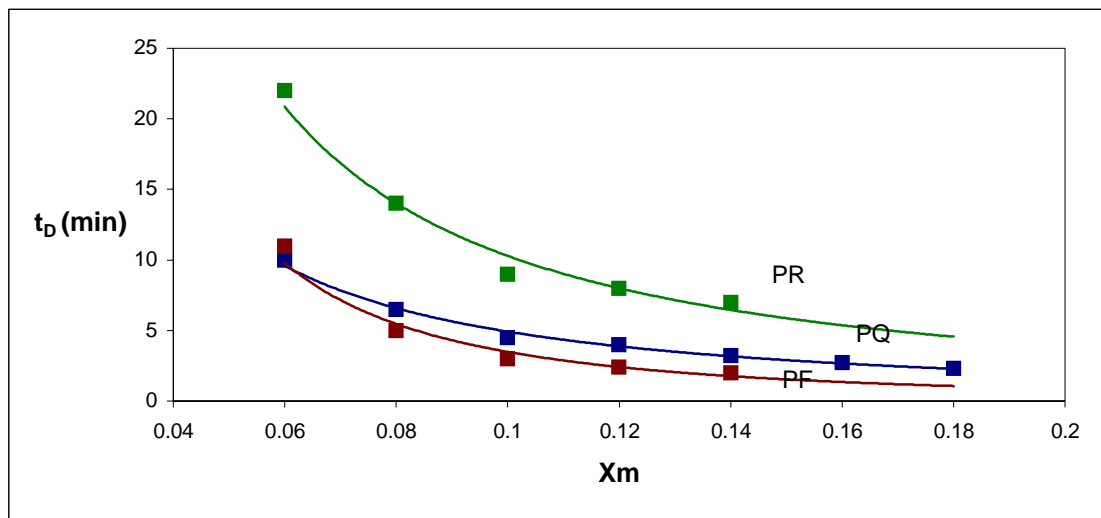


Figura 4.2.3: Temps de desintegració de cada paper en funció de la fracció massica a 26 rev/s.

En tots els casos s'observa una evolució decreixent de tipus potencial del temps de desintegració a mesura que augmenta la fracció massica. A la taula IV.2.2, es poden visualitzar les equacions corresponents en funció de cada tipus de paper i la velocitat de rotació.

Taula IV.2.2: Equacions de les corbes d'ajust per  $t_D$  en funció de  $X_m$

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$t_D = 0,0513 X_m^{-2,2549}$	0,9818
	PF	$t_D = 0,0379 X_m^{-2,0763}$	0,9833
	PR	$t_D = 0,3160 X_m^{-1,7614}$	0,9252
26 rev/s	PQ	$t_D = 0,2437 X_m^{-1,3052}$	0,9929
	PF	$t_D = 0,0334 X_m^{-2,0181}$	0,9682
	PR	$t_D = 0,4257 X_m^{-1,3833}$	0,9692

Els resultats de la taula IV.2.2, mostren que hi ha bones correlacions en el ajustament potencial i que es pot generalitzar el comportament del  $t_D$  en funció de  $X_m$  de forma que:

$$t_D = a \cdot X_m^{-k} \quad (\text{eq. 4.2.1})$$

Essent **a** i **k** constants que depenen del tipus de paper i velocitat del rotor per un rotor d'una geometria determinada.

Per tant, com a primer avantatge es pot concloure que augmentant  $X_m$  i/o  $\omega_{\text{ROTOR}}$  s'assoleix el mateix desfibrat en un menor període de temps ( $t_D$ ) i per tant, s'augmenta la capacitat de producció de la màquina. A més, és lògic pensar, que la quantitat d'energia necessària serà menor ja que el temps d'utilització de la màquina es redueix, fet que es tractarà més endavant.

Si es compara el comportament dels tres papers estudiats es pot veure que el temps necessari per a un mateix nivell de desfibrat és més gran pel paper PR, seguit del paper PQ i finalment del paper PF, essent les diferències sensibles.

Aquest comportament es podria explicar per una banda, pel diferent acabat de cada un d'aquests papers, que en el cas del paper revista consisteix en un estucat i un film de polietilè, que el fan resistent a condicions dures d'ús, i allarga el temps necessari pel seu desfibrat; el paper de qualitat PQ té una important capa d'estucat, i en l'altre extrem el paper fotocòpia PF és el que té un acabat més lleuger, i per tant es requereix un temps inferior per al seu desfibrat.

D'altra banda s'han estudiat algunes propietats físiques dels papers. Els resultats es reflexen a la taula IV.2.3.

Taula IV.2.3: Algunes característiques físiques dels papers

	PQ	PF	PR
<b>Gramatge</b> (g/m <sup>2</sup> )	127,5	85,7	61,0
<b>% Cendres</b>	42,5	19,9	34,6
<b>Cobb</b> (g/m <sup>2</sup> )	35,0	20,6	21,5
<b>Resistència mitjana en sec</b> <sup>(1)</sup> (kg força )	7,2	4,2	3,0
<b>Resistència mitjana en humit</b> <sup>(1)</sup> (kg força)	0,340	0,145	0,33
<b>Esquinçament</b> (mN)	275,00	496,65	639,65

Tal com es desprèn de les gràfiques de les figures 4.2.2 i 4.2.3, i s'ha dit anteriorment, els temps de desintegració per assolir el nivell de desintegració requerit són per ordre creixent PF, PQ i PR.

Els tres papers presenten composicions fibroses ben diferenciades i també tractaments d'acabat diferents. Atenent el gramatge, el paper revista és el més feble, en canvi és el que presenta més resistència a la desintegració, per tant aquest és un paràmetre que no ens aporta res a la discussió dels resultats sobre  $t_D$ . A més a més, el gramatge es veu modificat pel tractament superficial d'estucat en el cas de PQ i PR, paper estucat i lleugerament estucat respectivament.

El contingut en càrrega, malgrat ésser un material inert i que disminueix les propietats físiques del paper, tampoc ens aporta res donat que pot ésser en massa o formant part de l'estucat, tal com succeeix respectivament pel paper PF d'una banda i pels papers PR i PQ d'altra.

Tampoc la resistència en sec, ni l'esquinçament denoten cap tendència en el sentit d'augmentar o disminuir el temps de desintegració.

La resistència a la tracció en humit podria marcar-se com un índex, com pel cas de PF, però no en el cas de PR i PQ, donat que aquests últims presenten valors similars, en canvi els temps de desintegració són sensiblement diferents. Probablement un dels factors que més influeixen en el temps de desintegració és la capacitat d'hidratació del paper.

<sup>(1)</sup> Mitjana de la resistència a tracció en sentit màquina i en sentit transversal



En la gràfica de la figura 4.2.4, es pot veure l'evolució en quan a percentatge de resistència en sec que experimenten tres tipus de paper en funció del temps d'hidratació o immersió.

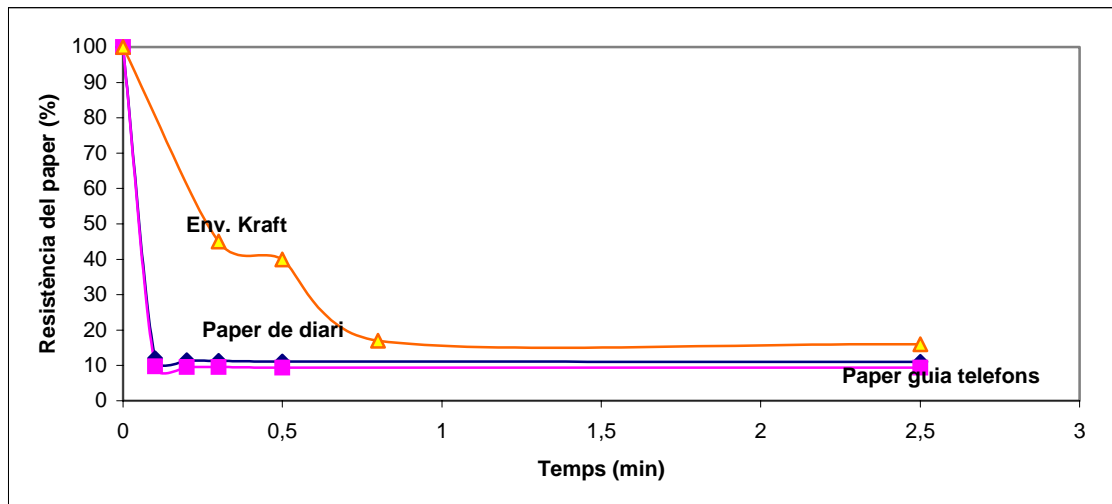


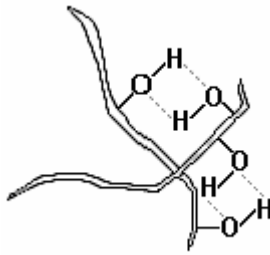
Figura 4.2.4: Pèrdues de resistències de diferents papers (Cherbit et al., 2004).

Per la major part dels papers s'observa una pèrdua entre el 80 i el 90% de la seva resistència després de poc temps d'immersió (Cherbit et al., 2004), en general de 1 a 2 minuts. Això explicaria en aquest cas el comportament del temps de desintegració dels diferents papers.

Així el paper PR porta un recobriments de polietilè que dificulta la seva hidratació donada la seva naturalesa hidrofòbica. El paper PQ estucat per les dues cares a part del lligant orgànic, conté productes orgànics que regulen el seu grau de hidrofobicitat. Finalment el paper PF només té un tractament amb midó, producte hidrofílic.

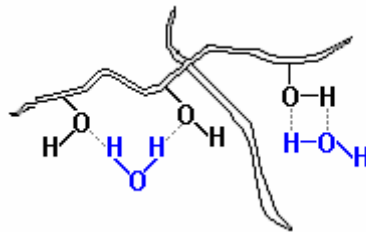
De totes maneres, aquestes reflexions i experiències no estarien d'acord amb les mesures del test Cobb efectuades en la superfície del paper (taula IV.2.3).

Per tant, tal com s'acaba de dir, la capacitat d'hidratació del paper pot ésser un bon indicador del temps de desintegració d'aquest. En l'estructura del paper, les fibres a part del fregament físic, desenvolupen ponts d'hidrogen entre elles (figura 4.2.5).



**Figura 4.2.5:** Mecanisme d'unió de les fibres de cel·lulosa per ponts d'hidrogen.

En medi aquós, una fibra resta individualitzada perquè aquesta forma ponts d'hidrogen amb l'aigua de més fàcil formació que entre fibres tal com mostra la figura 4.2.6.



**Figura 4.2.6:** Mecanisme d'individualització de les fibres de cel·lulosa en medi aquós per ponts d'hidrogen.

Per tant la capacitat d'hidratació és un factor clau per la desintegració. Per verificar la capacitat d'hidratació dels diferents paperots s'ha estudiat l'absorció d'aigua dels mateixos en funció del temps de contacte. Com a variables addicionals s'han tingut en compte la geometria de la mostra de paper i la temperatura.

Per estudiar l'absorció d'aigua, en primer lloc s'han realitzat mesures a temperatura ambient amb peces de paper de 10X10cm. És important comentar que aquesta planificació de l'experiment s'allunya de les condicions reals de desintegració, ja que en el púlper el paper es va trossejant progressivament, i per tant el mecanisme d'entrada d'aigua que té lloc en un full de dimensions 10X10 és menys important, ja que durant la desintegració ja no hi ha el full, sinó grups de fibres i petits trossos de paper. Per això s'ha prosseguit l'experiment amb tires de paper de dimensions més reduïdes.

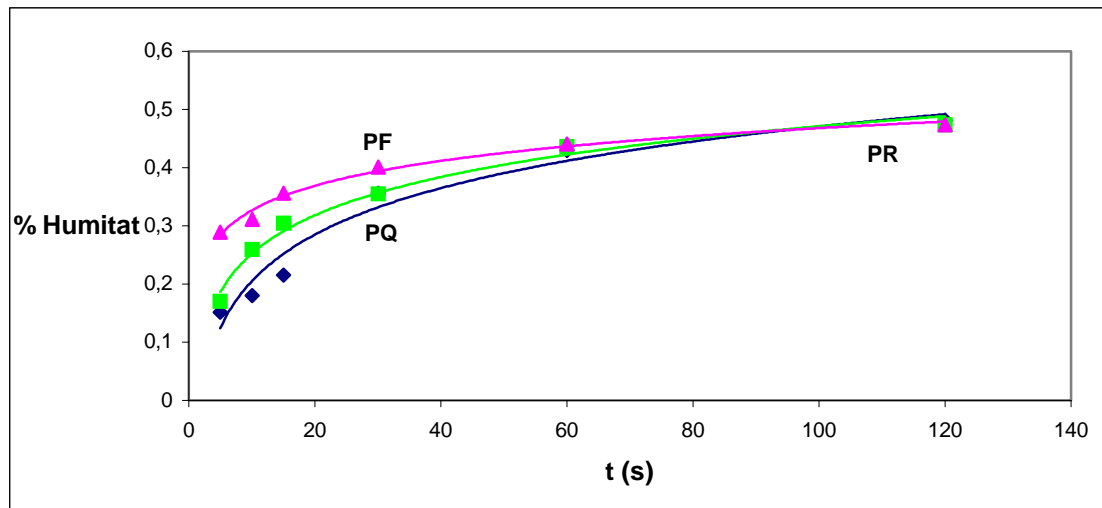
La taula IV.2.4, recull els valors de la capacitat d'hidratació ( $C_h$ ) observats en la hidratació a temperatura ambient del paper de geometria 10X10 cm. Com es pot observar, els resultats numèrics obtinguts indiquen que a major temps d'immersió, major és la quantitat d'aigua absorbida pel paper. A la vista dels resultats, el paper que té una major capacitat d'hidratació és el paper fotocòpia, seguit del paper revista i per últim el paper estucat de qualitat.

**Taula IV.2.4:** Capacitat d'hidratació a temperatura ambient expressada en % d'humitat i temps en segons.

		Temps (segons)					
Geometria	Paper	5	10	15	30	60	120
10x10	PQ	0.152	0.180	0.215	0.356	0.430	0.481
	PR	0.170	0.259	0.304	0.354	0.435	0.473
	PF	0.289	0.311	0.355	0.401	0.441	0.473

Gràficament, la figura 4.2.7, representa les evolucions de la capacitat d'hidratació dels tres papers estudiats i per una geometria quadrada 10X10cm de secció de paper. A la vista del gràfic, es pot observar que la diferència entre el valor de la capacitat d'hidratació és major en els primers intervals de temps, ja que a partir del primer minut, les capacitats d'hidratació són pràcticament les mateixes pels tres papers.

Aquest comportament pot ser explicat per la composició química del paper, tal i com ja s'ha fet anteriorment. Així el paper PR que posseeix un recobriment de polietilè que probablement dificulta la seva hidratació donada la seva naturalesa hidrofòbica, és el segon paper amb una capacitat d'hidratació menor. El paper PQ estucat per les dues cares, com que conté productes orgànics que regulen el seu grau de hidrofobicitat, és el paper amb una capacitat d'hidratació menor. Finalment el paper PF només té un tractament amb midó, producte hidrofílic i per tant, és el paper amb una major capacitat d'hidratació .



**Figura 4.2.7:** Capacitat d'hidratació expressada en % d'humitat per una secció 10X10cm.

Si es modifica la geometria de la secció del paper, per tal de treballar amb unes condicions més properes a la realitat del púlp, es pot observar un fet força curiós. Mentre que per geometries de 10X10cm el paper que tenia major capacitat d'hidratació era el paper fotocòpia, en el cas de geometries rectangulars (1x10 i 0,5X10) i per períodes de temps curts, és el paper revista el que absorbeix més aigua. La taula IV.2.5, mostra els resultats obtinguts pels assaigs d'hidratació realitzats sobre geometries rectangulars del paper.

Aquest fet pot ser degut a l'augment de la quantitat de superfície d'entrada d'aigua. En el cas del paper revista PR i paper de qualitat estucat PQ, el mecanisme d'entrada d'aigua depèn en gran mesura de la superfície de paper submergit, tal com es comentarà més endavant. Per tant, si es treballa amb geometries rectangulars, s'obtidran velocitats d'absorció d'aigua majors.

Taula IV.2.5: Capacitat d'hidratació expressada en % d'humitat i temps en segons. Assaigs en fred.

		Temps (segons)					
Geometria	Paper	5	10	15	30	60	120
1x10	PQ	-	0,257	-	0,331	0,465	0,491
	PR	-	0,384	-	0,432	0,447	0,441
	PF	-	0,336	-	0,427	0,473	0,531
2 de 0,5x10 <sup>(1)</sup>	PQ	-	0,383	-	0,445	0,478	0,505
	PR	-	0,397	-	0,438	0,459	-
	PF	-	0,383	-	0,436	0,474	-

Comparant els valors numèrics d'aquesta taula (Taula IV.2.5), amb els mostrats a la taula IV.2.4, obtinguts per una geometria quadrada 10X10, es pot observar que existeix una lleugera influència de la geometria del paper submergit i la capacitat d'hidratació d'aquest: A menor amplada de la secció de paper major capacitat d'hidratació. Aquest fet pot ser explicat per la diferent manera d'absorbir l'aigua dels tres papers. Concretament, s'ha observat que la penetració d'aigua a l'interior del paper segueix diferents mecanismes en els tres papers:

- En el paper estucat de qualitat PQ s'observa que inicialment l'aigua penetra amb preferència pels extrems del paper cap a l'interior, pel lloc on no hi ha estucat, demostrant que aquest ofereix una resistència al pas de l'aigua. Posteriorment, també s'observa que l'aigua aconsegueix entrar per diferents punts de la superfície d'estucat fins a impregnar-lo completament.
- En el paper revista PR l'aigua penetra a l'interior del paper per múltiples punts de la superfície, que van augmentant fins a impregnar completament el paper.

---

<sup>(1)</sup> En aquest darrer assaig es van utilitzar 2 seccions de 0,5X10 en el mateix assaig per tal de treballar amb la mateixa massa.

- En el paper fotocòpia PF des del primer moment en que es submergeix el paper en l'aigua, s'observa una penetració homogènia en tota la superfície de paper.

Aquest comportament observat visualment es reflecteix fidelment en el resultats expressats com a percentatge en pes d'aigua absorbida. Aquests mostren pel paper estucat de qualitat PQ una cinètica més lenta en comparació amb els altres dos tipus de paper, degut a la limitació en l'entrada d'aigua pels extrems del paper, mentre que en el PR i PF té lloc a tota la superfície.

La figura 4.2.8, mostra l'evolució de la capacitat d'hidratació per una secció 1X10 i la figura 4.2.9, la mostra per una secció 0,5X10.

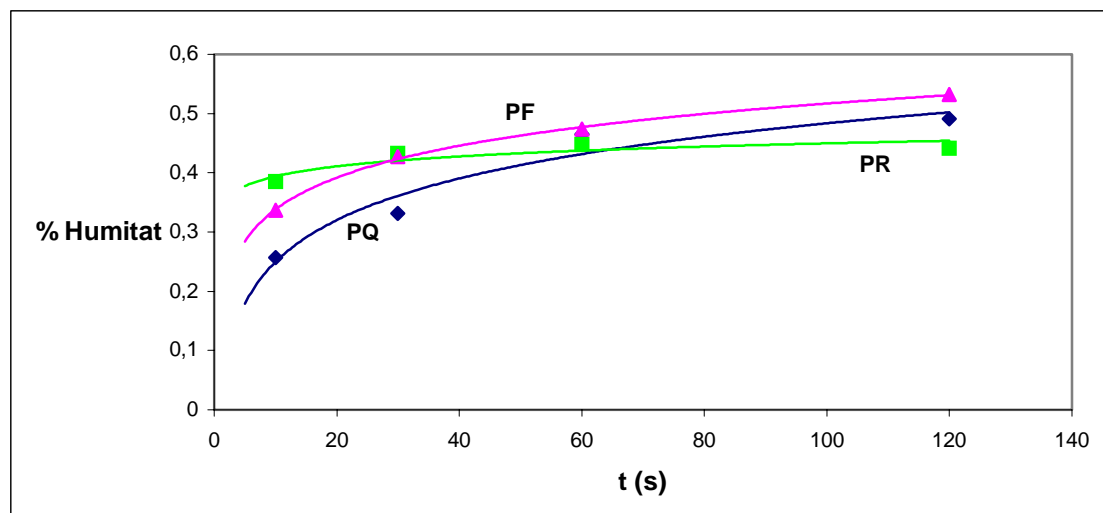


Figura 4.2.8: Capacitat d'hidratació expressada en % d'humitat per una secció 1X10.

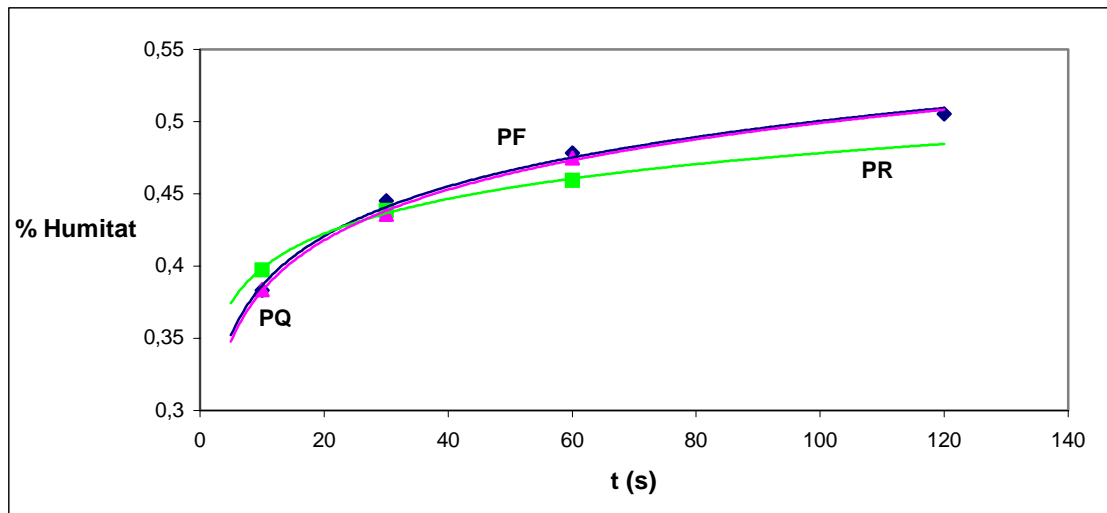


Figura 4.2.9: Capacitat d'hidratació expressada en % d'humitat per una secció 2 de 0,5X10.

En aquest cas, s'observa que la velocitat d'absorció d'aigua en els primers moments (30 segons) segueix l'ordre del gramatge del paper, essent més ràpida l'absorció com més prim és el paper. Més ràpid en el paper PR i més lent en el paper PQ. Passat un temps més llarg s'observa que la velocitat no coincideix amb la situació d'equilibri en que la proporció d'aigua absorbida no té ja relació amb el gramatge del paper, on el paper PR que més ràpidament absorbeix finalment arriba a un % inferior, del 40%, mentre que el paper PF arriba a absorbir més del 50% en els dos minuts de l'experiment.

Per acabar aquesta discussió, ens fixem ara en la influència de la temperatura sobre la capacitat d'absorció dels tres papers estudiats. La taula IV.2.6, mostra els resultats obtinguts en realitzar l'assaig anterior (geometries rectangulars) en calent (50 °C). Com es pot observar existeix una influència de la temperatura sobre la capacitat d'hidratació, obtenint-se una major facilitat per absorbir aigua quan es treballa en calent si es compara amb els resultats obtinguts en les taules IV.2.4 i IV.2.5.

Taula IV.2.6: Capacitat d'hidratació expressada en % d'humitat i temps en segons. Assaigs en calent 50°C.

Geometria	Paper	Temps (segons)					
		5	10	15	30	60	120
1x10 en calent	PQ	-	0,441	-	0,476	0,500	-
	PR	-	0,456	-	0,472	0,507	-
	PF	-	0,438	-	0,501	0,505	-
2 de 0,5x10 en calent	PQ	-	0,474	0,487	0,508	0,495	0,514
	PR	-	0,457	0,501	0,444	0,497	0,478
	PF	-	0,446	0,436	0,426	0,495	0,519

De manera gràfica, si es compara els experiments a temperatura ambient amb els fets a 50°C (figura 4.2.10) es pot observar que en calent s'arriba quasi a l'equilibri amb entre 5 i 10 segons, en lloc dels 20 segons que aproximadament són necessaris en fred. A més, les capacitats d'absorció són majors quan es treballa en aquestes condicions.

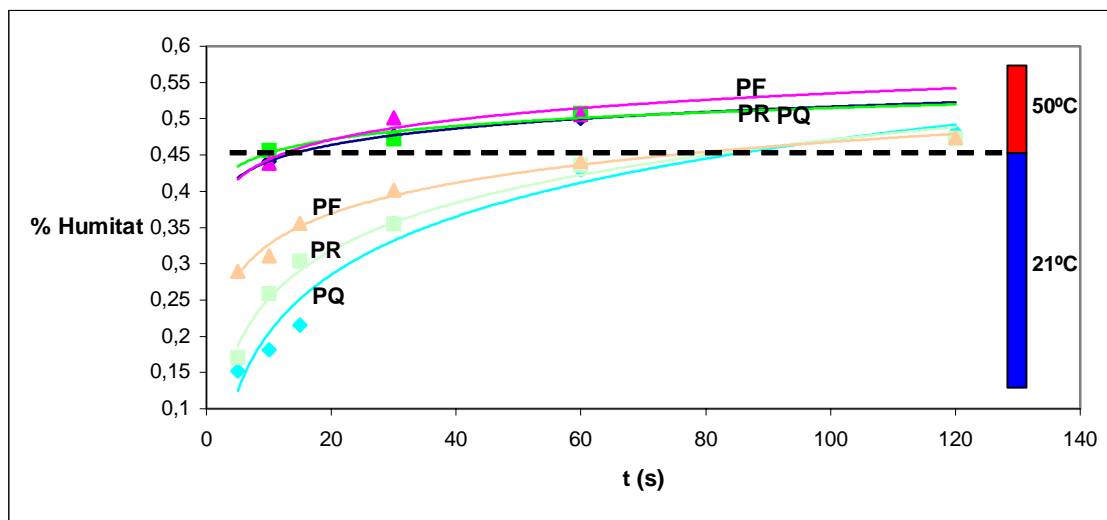


Figura 4.2.10: Capacitat d'hidratació expressada en % d'humitat per una secció 1X10 a temperatura ambient i en calent (50°C).



A la vista de la gràfica de la figura 4.2.10, es pot constatar que la influència de la temperatura és considerable, aconseguint-se una major capacitat d'hidratació quan es realitza la immersió del paper en aigua calenta.

L'augment de la velocitat d'hidratació és de l'ordre del 200% durant els primers instants d'immersió, reduint-se progressivament a mesura que augmenta la durada de l'assaig a valors de 120%, valor que encara pot considerar-se com a positiu. Per tant, aquesta seria una conclusió interessant d'aquest estudi: el paper s'hidrata amb més facilitat quan l'aigua és calenta. Industrialment té una aplicació clara i directa, si es realitza el pulpejat en suspensions on l'aigua sigui calenta, es podrà hidratar-lo amb més facilitat i així desfibrar-lo més ràpidament.

Si es realitza ara el mateix estudi però amb una geometria diferent (figura 4.2.11), es pot observar que aquest segueix un comportament similar al que es descriu en la figura 4.2.10. És a dir, les capacitats d'hidratació són considerablement majors en els assaigs en calent. En aquest cas concret, es dona un fet força curiós, mentre que treballant a temperatura ambient el paper amb menys capacitat d'hidratació és el paper de qualitat, quan es treballa a 50 °C, és aquest paper el que té una major capacitat d'hidratació. Per tant, aquí es fa evident la forta influència que existeix de la geometria i la temperatura de treball sobre la capacitat d'hidratació del paper.

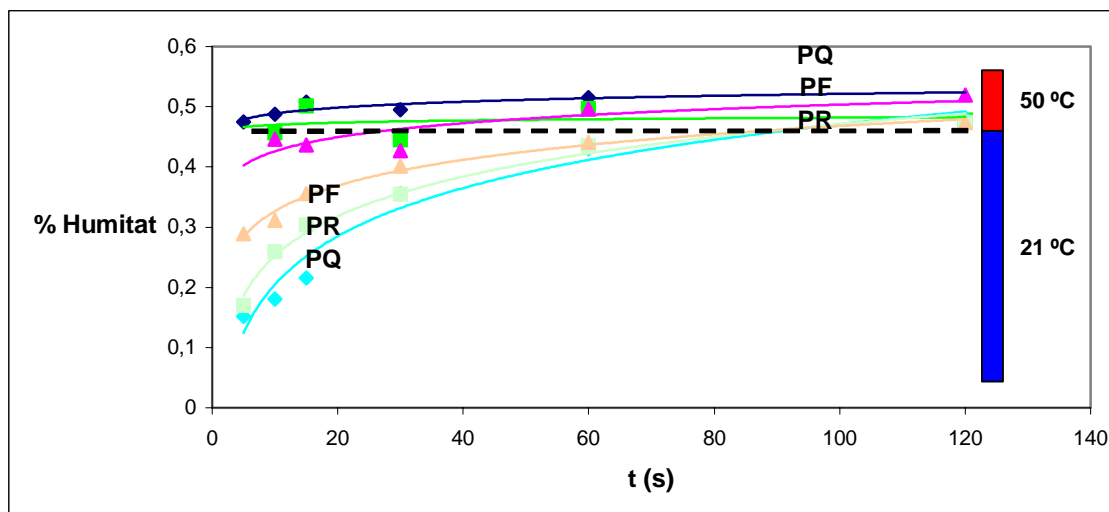


Figura 4.2.11: Capacitat d'hidratació expressada en % d'humitat per una secció 2 de 0,5X10 a temperatura ambient i en calent (50°C).

Una vegada analitzades cadascuna de les capacitats d'hidratació de les diferents geometries escollides, es pot constatar que la hipòtesi de partida era certa, és a dir que la capacitat d'hidratació del paper no és un bon indicador del temps de desintegració d'aquest, però hi ha indicis de que hi pot haver una certa relació. En concret, si s'observen els valors dels temps de desintegració mostrats a la taula IV.2.1, es pot veure que el paper fotocòpia PF és el que requereix un temps de desintegració menor per tal d'assolir el desfibratge desitjat ( $0,01 \%I_{SV}$ ), li segueix el paper de qualitat estucat PQ i per últim, és el paper revista PR el que precisa d'un major període de temps per desintegrar-se. Per tant, el comportament observat és aquest:

$$t_D^{PR} > t_D^{PQ} > t_D^{PF}$$

Resultaria lògic pensar que el temps de desintegració menor correspon al paper amb una major capacitat d'absorció d'aigua. Per tant, que les capacitats d'hidratació teòriques seguirien l'ordre que s'indica a continuació:

$$C_h^{PF} > C_h^{PQ} > C_h^{PR}$$

Si ens fixem ara en els resultats que hem obtingut experimentalment, podem constatar que el resultat esperat i l'obtingut coincideixen en la gran majoria dels casos. Únicament s'ha obtingut una capacitat d'hidratació major pel paper revista en el cas de geometries quadrades 10X10, però com que ja s'ha comentat que aquest cas s'allunya considerablement de la realitat no el tindrem en compte.

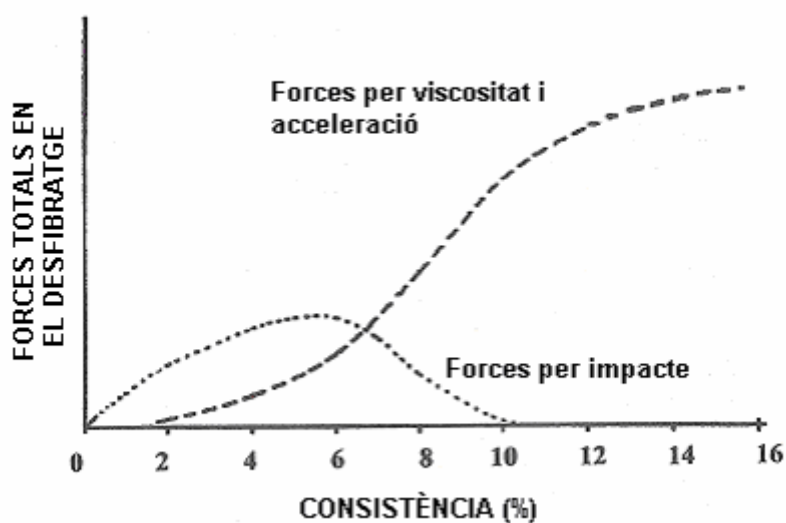
Cal aclarir que ens hem fixat en els valors de les capacitats d'hidratació en el darrer interval de temps, ja que aquest coincideix amb un valor ja estabilitzat de la capacitat d'hidratació. A més, els pulpejats que es van realitzar tots tenen un temps de duració superior als dos minuts.

#### 4.2.1. Anàlisi de l'evolució de la desintegració

Les gràfiques de les figures 4.2.2 i 4.2.3, permeten apreciar dues zones o intervals en l'evolució del temps de desintegració en funció de la fracció màssica. Un primer interval es caracteritza per una evolució en sentit decreixent del  $t_D$  bastant pronunciat i un segon interval amb un decreixement més moderat. Determinar amb exactitud el

límit o canvi de tendència entre un i altre és difícil, però segur que es situa entre 0,08 i 0,1 de fracció massica.

En un estudi de desintegració sobre les pastes de fibra verge (Paraskevas, 1983) s'estableix que hi ha dos intervals en funció de la consistència o fracció massica de treball. Aquests dos intervals venen determinats pel diferent comportament de la suspensió en el púlper. A la gràfica de la figura 4.2.12, es reflexa l'efecte de la consistència en el desfibratge de pastes de fibra verge.



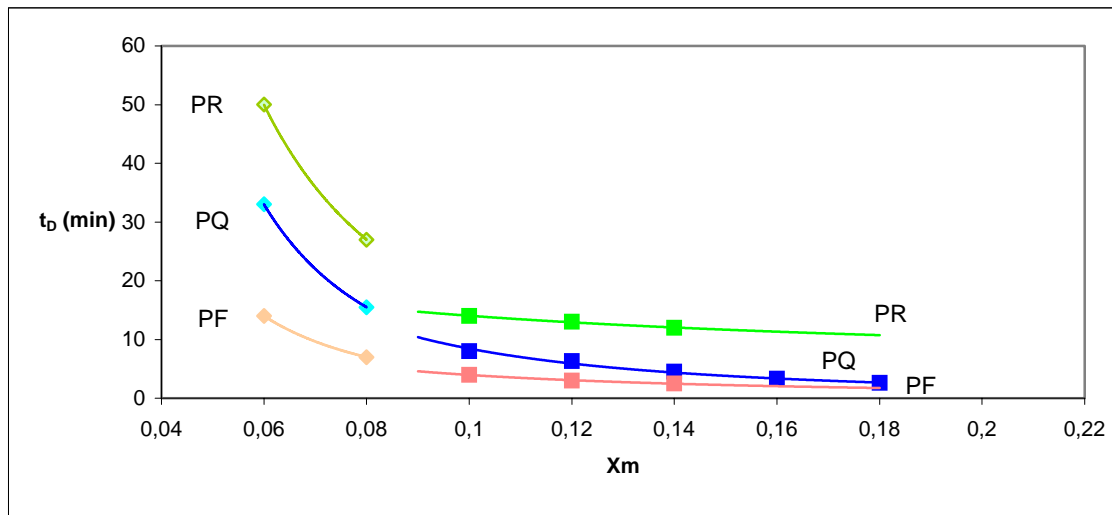
**Figura 4.2.12:** Efecte de la consistència sobre el desfibratge (Paraskevas, 1983).

Fins a una fracció massica del 0,1 (consistència del 10%), la desintegració seria deguda a la suma de les forces d'impacte contra el rotor i els elements metàl·lics del púlper i les forces de viscositat i acceleració. A partir d'una fracció massica del 0,1, són les forces de viscositat i acceleració les responsables de la desintegració.

Si s'observa la figura 4.2.12, a partir d'una fracció massica del 0,08 es veu que la contribució al desfibratge de les forces d'impacte és molt petita. Visualment s'observa en el púlper que la velocitat de la suspensió és alta en el primer interval i més baixa en el segon. Velocitats altes permeten que les forces d'impacte actuïn i això solament és possible a unes determinades consistències, inferiors al 8% (0,08 de fracció massica).

Per tant, la consistència límit per distingir entre baixes i, mitjanes i altes fraccions màssiques, s'estableix en el 8% i analitzarem el comportament del temps de desintegració entre el 6% i el 8% de consistència per un costat i a partir del 9% de consistència per l'altre.

A la figura 4.2.13, s'observa aquests diferents comportaments en els dos intervals anteriorment comentats.



**Figura 4.2.13:** Temps de desintegració  $t_D$  (min) en els dos intervals de desfibratge existents per un pulpejat a 19 rev/s.

Les corresponents equacions d'ajust es mostren a la taula IV.2.7. Com es pot veure, totes les equacions d'ajust són del tipus potencial tan per l'interval comprès entre 0,06 i 0,08, com l'interval entre 0,09 i 0,18. Però, amb la diferència que tant la potència com l'exponent de cada interval per a un mateix paper, són sensiblement diferents pels dos intervals estudiats. En tots els casos s'ha pogut observar que es tenen exponents menors en el segon interval, la qual cosa implica un comportament diferenciat en aquests rangs de fraccions màssiques, és a dir, per increments grans de  $X_m$  es tenen increments petits de  $t_D$ . En canvi, per l'altre interval, es tenen unes fraccions majors i per tant, per petits augments de  $X_m$  s'obtenen grans reduccions del  $t_D$ .

Taula IV.2.7: Equacions de les corbes d'ajust pels diferents  $t_D$  en funció de  $X_m$  a 19 rev/s.

Interval	Tipus	Equació	$r^2$
0,06-0,08	PQ	$t_D = 0,0139X_m^{-2,7671}$	0,9988
	PF	$t_D = 0,0142 X_m^{-2,4504}$	0,9999
	PR	$t_D = 0,0486X_m^{-2,4755}$	0,9917
0,09-0,18	PQ	$t_D = 0,0918 X_m^{-1,9637}$	0,9929
	PF	$t_D = 0,1568X_m^{-1,4023}$	0,9935
	PR	$t_D = 4,9068 X_m^{-0,4566}$	0,9692

És per tant interessant conèixer bé aquests dos intervals a l'hora de dimensionar i escollir el púlder. Si es representa la mateixa gràfica però ara amb els valors obtinguts per una velocitat d'agitació de 26 rev/s, s'obté el gràfic de la figura 4.2.14.

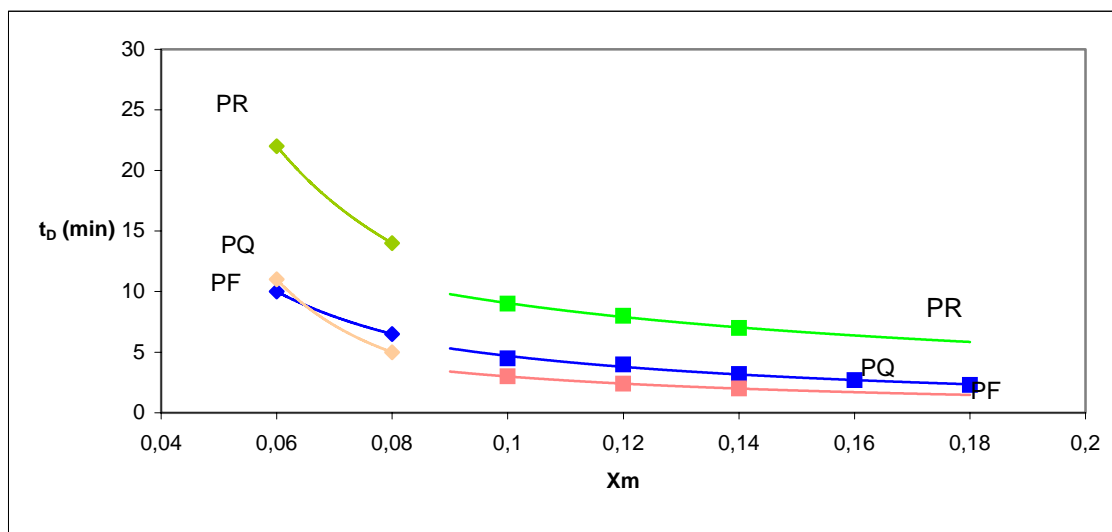


Figura 4.2.14: Temps de desintegració en els dos intervals de desfibratge existents per un pulpejat a 26 rev/s.

Com es pot observar en el gràfic, les tendències ja marcades en la gràfica de la figura 4.2.13, es repeteixen en aquesta gràfica. És a dir, independentment del temps d'agitació, el paper que precisa d'un major temps de desintegració és el paper revista, seguit del paper de qualitat i per últim el paper fotocòpia. Les equacions d'ajust

continuen essent del tipus potencial (taula IV.2.8). Per últim comentar que l'única diferència apreciable detectada és que els comportaments davant la desintegració del paper de qualitat i el paper fotocòpia a baixes consistències és pràcticament el mateix.

Taula IV.2.8: Equacions de les corbes d'ajust per les diferents  $t_D$  en funció de  $X_m$  a 26 rev/s

Interval	Tipus	Equació	$r^2$
0,06-0,08	PQ	$t_D = 0,1664 X_m^{-1,7413}$	0,9956
	PF	$t_D = 0,1248 X_m^{-1,5601}$	0,9993
	PR	$t_D = 0,0082 X_m^{-2,5528}$	0,9975
0,09-0,18	PQ	$t_D = 0,16323 X_m^{-0,7439}$	0,9929
	PF	$t_D = 0,3139 X_m^{-1,1748}$	0,9822
	PR	$t_D = 0,1867 X_m^{-1,2056}$	0,9999

#### 4.2.2. Estudi de les velocitats de desintegració mitjanes

La disminució potencial dels temps de desintegració amb la fracció màssica suggereix que la velocitat de desintegració del paper augmenta considerablement amb l'augment de la fracció màssica.

Una manera d'avaluar la velocitat de desintegració és veure la variació de l'índex de Sommerville en funció del temps de desintegració. Cal remarcar que això representarà la velocitat mitjana de desaparició de les pastilles de paperot per unitat de temps.

Per establir aquesta velocitat mitjana suposarem que l'índex de Sommerville a temps inicial és del 100% donat que tota la massa sòlida quedaria retinguda en la planxa perforada de l'aparell Sommerville.

Es defineix com a velocitat mitjana de desintegració, el quocient entre l'índex de Sommerville inicial (100%) menys l'índex de Sommerville assolit en el temps de desintegració ( $t_D$ ) i el temps necessari per assolir-lo ( $t_D$ )

$$\bar{V}_D = \frac{I_{SV}^{t=t_0} - I_{SV}^{t=t_D}}{t_D - t_0} = \frac{100 - 0,01}{t_D} \cong \frac{100}{t_D} \quad (\text{eq. 4.2.2})$$

La taula IV.2.9, mostra el valor d'aquestes velocitats de desintegració per als tres papers estudiats i les dues velocitats de rotació utilitzades. Com calia esperar, a mesura que augmenta la fracció màssica de la suspensió augmenta considerablement la velocitat de desintegració del paper, ja que com s'ha vist durant la discussió de l'apartat anterior, els  $t_D$  es redueixen a mesura que augmenta la fracció màssica i per tant, a la vista de l'equació 4.2.2, és evident que la velocitat mitjana de desintegració augmentarà a mesura que els temps de desintegració es redueixen.

Taula IV.2.9: Velocitat mitjana de desintegració ( $\bar{V}_D$ ) per assolir un  $I_{SV}$  màxim del 0,01%.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	$X_m$						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	3,0	6,5	12,5	15,9	22,2	30,3	38,5
	26 rev/s	10,0	15,4	22,2	25,0	31,3	37,0	43,5
PF	19 rev/s	7,1	14,3	25,0	33,3	40,0	-	-
	26 rev/s	9,1	20,0	33,3	41,7	50,0	-	-
PR	19 rev/s	2,0	3,7	7,1	7,7	8,3	-	-
	26 rev/s	4,5	7,1	11,1	12,5	14,3	-	-

Com es pot veure en els valors numèrics de la taula IV.2.9, les velocitats de desintegració pels tres papers estudiats són majors quan s'agita amb més velocitat la suspensió cel·lulòsica introduïda al púlp. Per tant, quan s'aplica una major velocitat d'agitació, la pasta respon d'una manera més eficient.

Si s'estudien ara els increments totals de la velocitat de desintegració amb la fracció màssica, es poden constatar increments superiors dels 400%. En concret, a una velocitat de rotació de 19rev/s l'increment pel paper fotocòpia és de 563%, en el cas del paper revista l'augment és del 415% i pel paper estucat de qualitat l'augment és del 1283%.

Aquests increments són més moderats a mesura que augmenta la velocitat de rotació del rotor. Obtenint així per una velocitat de 26 rev/s uns augments de 549% pel paper fotocòpia, 318 % pel paper revista i 435% pel paper estucat de qualitat.

A continuació, es representa en una mateixa gràfica l'evolució de la velocitat mitjana de desintegració per als tres papers estudiats i les dues velocitats d'agitació, aquesta gràfica és la que recull la figura 4.2.15.

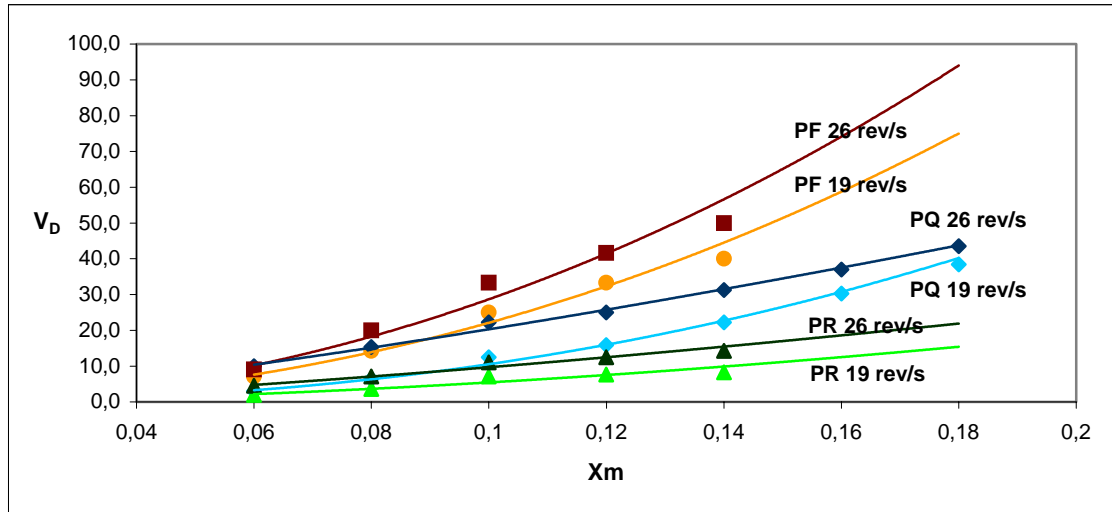


Figura 4.2.15: Velocitats mitjanes de desintegració a 19 rev/s i 26 rev/s.

Com es pot veure en la gràfica de la figura anterior, les tendències de les velocitats de desintegració continuen essent potencials per a tots els papers i velocitats d'agitació estudiades. Experimentant velocitats de desintegració majors el paper fotocòpia, seguit pel paper estucat de qualitat i per últim és el paper de revista el que té velocitats de desintegració menors. La taula IV.2.10, recull cadascuna de les equacions d'ajust de totes les corbes analitzades.

Taula IV.2.10: Equacions de les corbes d'ajust per les diferents velocitats mitjanes en funció de X<sub>m</sub>

ω ROTOR	Tipus	Equació	r <sup>2</sup>
19 rev/s	PQ	$\bar{V}_D = 1981,4 X_m^{2,2726}$	0,9919
	PF	$\bar{V}_D = 2640,2 X_m^{2,0765}$	0,9903
	PR	$\bar{V}_D = 316,49 X_m^{1,7614}$	0,9556
26 rev/s	PQ	$\bar{V}_D = 410,4 X_m^{1,3052}$	0,9929
	PF	$\bar{V}_D = 2992,4 X_m^{2,0181}$	0,9815
	PR	$\bar{V}_D = 231,56 X_m^{1,3775}$	0,9819



També és interessant constatar els increments parcials que es produeixen en els diferents intervals tractats. Per tal de facilitar la comprensió del fenomen s'han recollit els diferents increments en la taula IV.2.11.

**Taula IV.2.11:** Incrementos parcials de velocitat de desintegració en funció de l'increment de fracció màssica ( $\Delta\bar{V} / \Delta X_m$ ) en l'interval de fraccions màssiques compreses entre 0,06 i 0,10 i, l'interval comprès entre 0,10 i 0,18. Valors calculats a partir de les equacions de la taula IV. 2.10.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	Interval		Total
		0,06-0,10	0,10-0,14 <sup>1</sup> / 0,18 <sup>2</sup>	0,06-0,14 <sup>1</sup> / 0,18 <sup>2</sup>
PQ	19 rev/s	181	370	307
	26 rev/s	247	293	277
PF	19 rev/s	361	559	460
	26 rev/s	461	697	579
PR	19 rev/s	81	110	96
	26 rev/s	122	143	132

A la vista dels resultats, es posa de manifest el fet que existeixen uns increments majors de la velocitat de desintegració del paper quan es treballa a mitjanes consistències. Aquest fet pot ser explicat per l'augment de les forces de fricció que es produeixen quan augmenta la fracció màssica de la suspensió cel·lulòsica (figura 4.2.12). Aquesta major fricció produeix un augment del poder desintegrador del púlp, fent-lo d'aquesta manera més eficient.

#### 4.2.3. Estudi de l'efecte del temps de desfibrat sobre la producció del procés

De forma intuïtiva es pot dir que existeix un efecte directe entre la durada de l'operació de desintegració i la producció d'aquesta. En aquest apartat s'estudiarà en detall aquest efecte. Com s'ha pogut observar en les taules IV.2.1, el temps de desintegració

<sup>1</sup> S'estudia l'interval 0,10-0,14 pel PR i el PF

<sup>2</sup> S'estudia l'interval 0,10-0,18 pel PQ

o temps de durada de l'operació es redueix de forma important a mesura que augmenta la consistència de la pasta, a més al augmentar la consistència de la pasta també augmenta el pes de paper tractat, donat que es treballa a volum constant.

Per tant, es pot predir que un pulpejat a mitjana o alta consistència és una opció molt aconsellable ja que combina un temps d'operació reduït i un alt pes de matèria tractada, sempre en equilibri amb la potència a instal·lar. La taula IV.2.12, mostra les taxes de producció del púlper expressades en kg/h pels tres papers estudiats i les dues velocitats d'agitació emprades.

Taula IV.2.12: Producció del púlper en kg/h per assolir un  $I_{SV}$  màxim del 0,01%.

		PROD (kg/h)						
Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	2,2	6,2	15,0	22,9	37,3	58,2	83,1
	26 rev/s	7,2	14,8	26,7	36,0	52,5	71,1	93,9
PF	19 rev/s	5,1	13,7	30,0	48,0	67,2	-	-
	26 rev/s	6,5	19,2	40,0	60,0	84,0	-	-
PR	19 rev/s	1,4	3,6	8,6	11,1	14,0	-	-
	26 rev/s	3,3	6,9	13,3	18,0	24,0	-	-

En certa manera, malgrat tractar-se d'un procés discontinu, la producció horària referida a un objectiu determinat de desintegració està relacionada també amb una velocitat de desintegració del paper. Per demostrar si existeix una correlació entre la producció de pasta i la velocitat de desintegració, s'ha representat en les figures 4.2.16 i 4.2.17, la relació entre aquestes dues variables. Com es pot veure estan relacionades linealment.

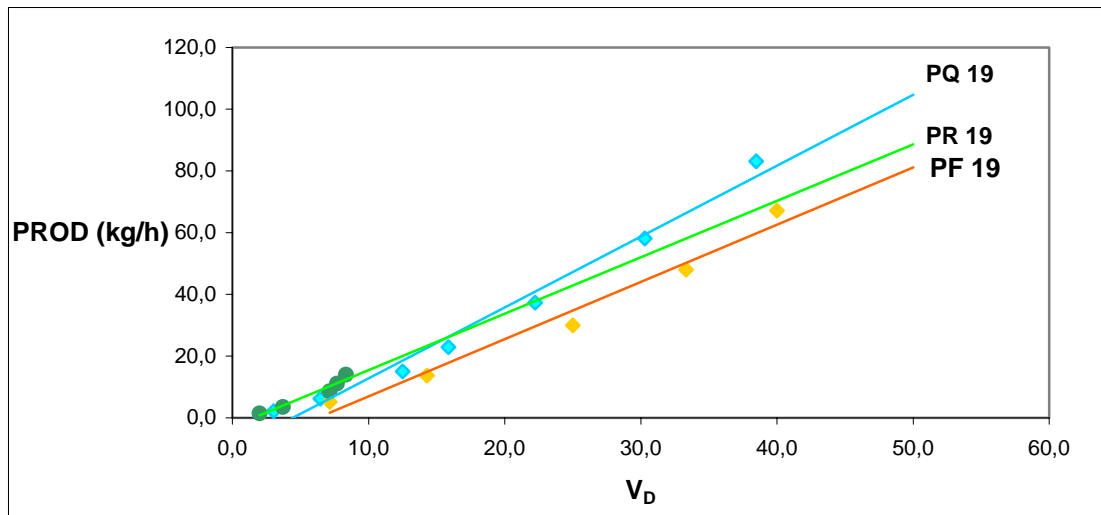


Figura 4.2.16: Correlació entre  $\bar{V}_D$  i producció (kg/h) per  $\omega_{\text{ROTOR}}$  de 19 rev/s

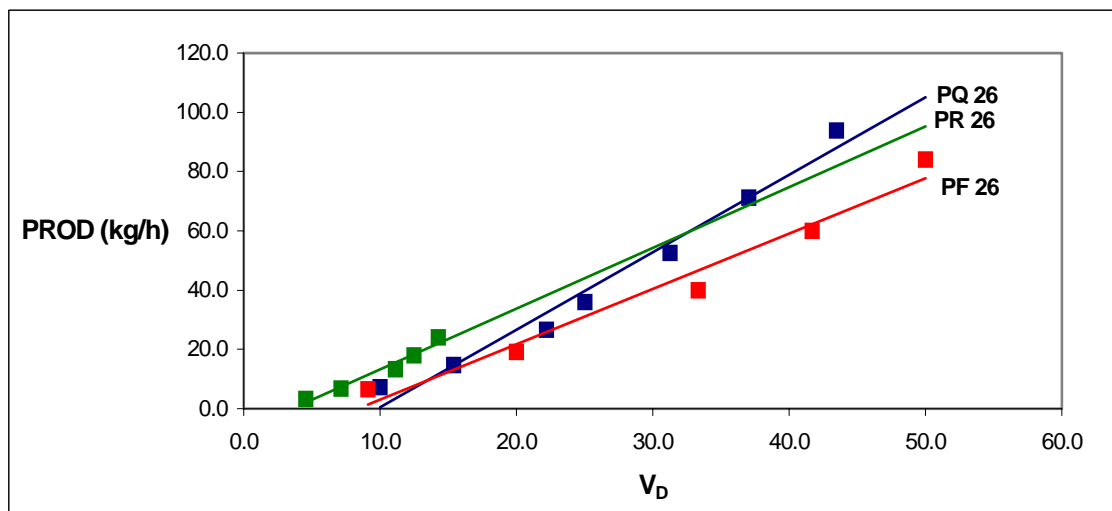


Figura 4.2.17: Correlació entre  $\bar{V}_D$  i producció (kg/h) per  $\omega_{\text{ROTOR}}$  de 26 rev/s

A la vista dels resultats, es posa de manifest que la producció està directament relacionada amb la velocitat de desintegració del paper i que presenta forts augments amb l'increment de  $X_m$ . Aquest augment és per una velocitat de rotació de 19 rev/s de 37,8 vegades en el cas del paper estucat de qualitat, de 13,2 vegades pel paper fotocòpia i de 7,3 vegades pel paper revista.

La taula IV.2.13, mostra les equacions d'ajust de les diferents corbes mostrades a les figures 4.2.16 i 4.2.17. Com es pot observar, totes corresponen a corbes de tipus lineal.

Taula IV.2.13: Equacions de les corbes d'ajust de producció en funció de velocitat mitjana de desintegració.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$PROD = 2,2951 \cdot \bar{V}_D - 10,125$	0,9821
	PF	$PROD = 1,8559 \cdot \bar{V}_D - 11,641$	0,9755
	PR	$PROD = 1,8281 \cdot \bar{V}_D - 2,8274$	0,946
26 rev/s	PQ	$PROD = 2,6143 \cdot \bar{V}_D - 25,691$	0,9762
	PF	$PROD = 1,8619 \cdot \bar{V}_D - 15,432$	0,9687
	PR	$PROD = 2,0501 \cdot \bar{V}_D - 7,2385$	0,9621

Les figures 4.2.18 i 4.2.19, mostren les tendències que segueixen les taxes de producció dels diferents papers estudiats en funció de la fracció massica de la suspensió cel·lulòsica introduïda al púlper.

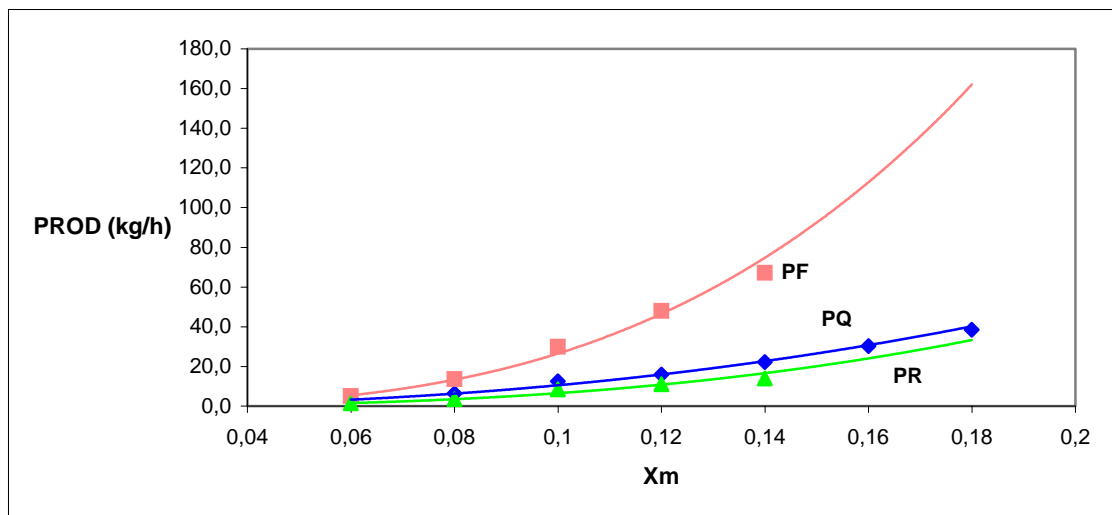
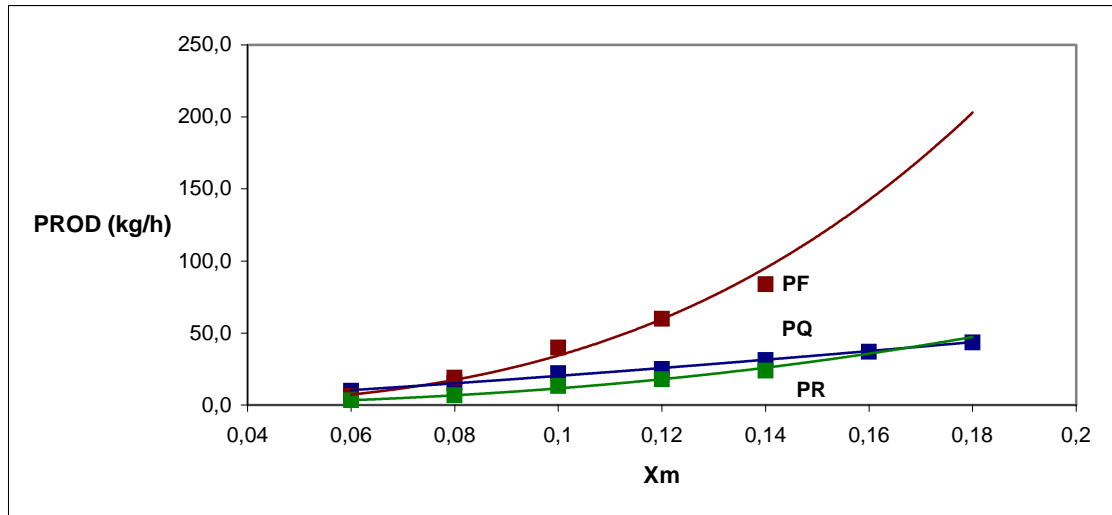


Figura 4.2.18: Producció en kg/h a 19 rev/s en funció de  $X_m$ .

Com es pot veure en aquesta gràfica i en la que es mostra a continuació, les tendències que segueixen les taxes de producció continuen essent potencials, però ara amb uns quocients importants que fan que per petits augments de fracció massica,

es produeixin grans increments en la producció del púlper, augmentant així enormement el seu rendiment. Les corresponents equacions d'ajust es mostren a la taula IV.2.14.



**Figura 4.2.19:** Producció en kg/h a 26 rev/s en funció de  $X_m$ .

La comparació de les dues gràfiques mostra que les taxes de producció són majors per velocitats de rotació del púlper també majors. La producció és més elevada amb una velocitat de rotació de 26 rev/s que amb una velocitat de rotació de 19 rev/s. Aquest fet s'explica novament a partir del temps de desintegració. Quan s'apliquen velocitats de rotació majors el temps necessari per desintegrar el paper és menor i per tant la productivitat és major.

Un altre aspecte interessant a remarcar és el fet que el paper fotocòpia té unes taxes de producció marcadament superiors que els altres dos papers estudiats. Aquest fet és deu a la facilitat que ofereix aquest paper per desintegrar-se, com s'ha vist és el paper que presenta uns temps de desintegració més baixos i unes velocitats de desintegració majors.

Taula IV.2.14: Equacions de les corbes d'ajust per  $t_D$  en funció de  $X_m$ 

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$PROD = 23777 X_m^{3,2726}$	0,9961
	PF	$PROD = 31665 X_m^{3,0763}$	0,9923
	PR	$PROD = 3798,1 X_m^{2,7614}$	0,9682
26 rev/s	PQ	$PROD = 4924,8 X_m^{2,3052}$	0,9977
	PF	$PROD = 35912 X_m^{3,0181}$	0,9856
	PR	$PROD = 2819,2 X_m^{2,3833}$	0,9894

Si s'estudien ara els increments totals de producció quan s'agita la suspensió a una velocitat major, en concret a una velocitat de 26 rev/s, s'obtenen a  $X_m$  de 0,18 els increments següents: 13 vegades pel paper estucat de qualitat, 12 vegades pel paper fotocòpia i 6,3 vegades pel paper revista. Per tant, es pot observar que aquests augments totals són lleugerament menors que els obtinguts a una velocitat de rotació menor.

L'explicació d'aquest comportament es deu al fet que els temps necessaris per desintegrar el paper són més homogenis (varien menys amb la fracció màssica) quan se'l sotmet a un estat d'agitació major. Per tant, les taxes de producció solament augmentaran pel fet d'incrementar-se la quantitat de paper tractat i no per la reducció tan acusada dels temps d'operació que es dona al desintegrar el paper a una velocitat de rotació menor. Per altra banda i de manera general, es pot dir que aquesta producció es dispara quan es treballa a mitjanes consistències aconseguint-se d'aquesta manera els guanys que es mostren a la taula IV.2.15.

Com es pot observar a la taula IV.2.15, els increments de producció en el rang de consistències màssiques mitjanes o altes, són fins 4 vegades superiors que els que es produeixen a baixes fraccions màssiques en el cas del paper estucat de qualitat tractat a 19 rev/s, 2 vegades superior pel paper fotocòpia i 1,2 vegades pel paper revista.

**Taula IV.2.15:** Increments parcials de producció en funció de l'increment de  $X_m$  ( $\Delta PROD / \Delta X_m$ ) en l'interval de fraccions màssiques compreses entre 0,06 i 0,08 i, l'interval comprès entre 0,09 i 0,18.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	Interval		Total
		0,06-0,08	0,09-0,14 <sup>(1)</sup> / 0,18 <sup>(2)</sup>	0,06-0,14 <sup>(1)</sup> / 0,18 <sup>(2)</sup>
PQ	19 rev/s	200	851	674
	26 rev/s	380	840	723
PF	19 rev/s	430	930	776
	26 rev/s	635	1100	550
PR	19 rev/s	110	135	156
	26 rev/s	180	268	259

Per velocitats d'agitació de 26 rev/s, aquests increments són inferiors i valen 2,2 vegades superiors pel paper estucat de qualitat, 1,7 vegades superiors pel paper fotocòpia i 1,5 vegades pel paper revista.

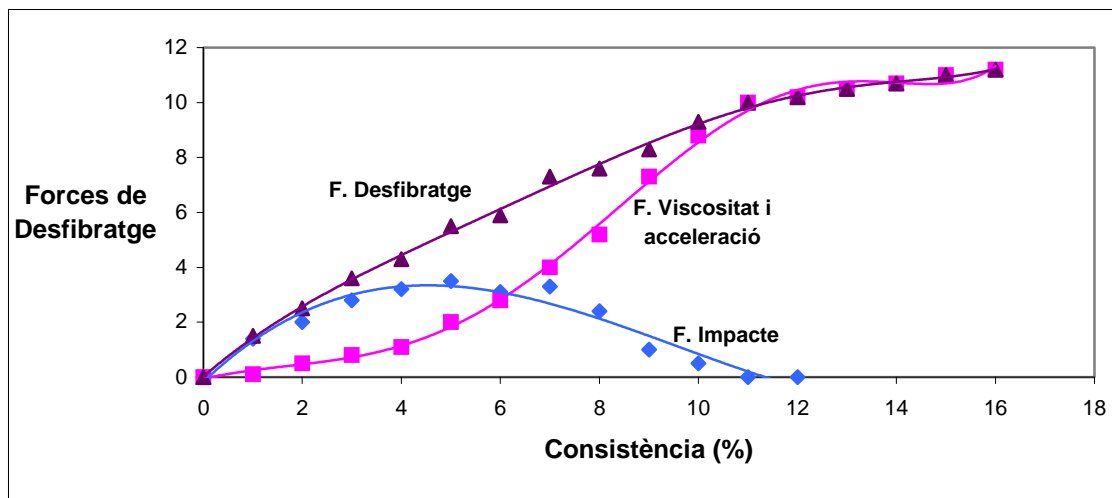
#### 4.2.4. Anàlisi de la producció i la velocitat mitjana de desintegració

En els apartats anteriors s'ha pogut constatar la disminució espectacular del temps de desintegració ( $t_D$ ) amb l'augment de la consistència. Com a conseqüència de la disminució del  $t_D$ , la velocitat mitjana de desintegració augmenta quan es valora mitjançant la variació de l'índex de Sommerville amb el temps. De la mateixa manera la producció del sistema s'incrementa substancialment en augmentar la fracció màssica. Aquests increments han de tenir per força alguna relació amb les forces i les seves magnituds involucrades en el procés de desintegració.

Molts pocs autors s'han interessat en el tema del desfibratge i desintegració de fibres de cel·lulosa verges (Paraskevas, 1983; Holik, 1988) i encara menys en fibres de cel·lulosa procedents de paper reciclat (Bennington, 1998; Fabry, 1999).

Els treballs desenvolupats per Holik a escala fonamental són difícilment aplicables, d'una manera quantitativa però sí d'una manera qualitativa (Fabry, 1999). Bennington formula la seva teoria basant-se en la superfície de contacte entre les fibres i el rotor. En aquest cas el treball s'ha desenvolupat utilitzant un sol rotor i per tant, l'efecte de la superfície sobre el desfibrat i la desintegració és constant. Hi ha però aspectes derivats de la velocitat del rotor que poden tenir a veure amb la superfície del rotor en contacte amb la suspensió. Una manera interessant d'abordar qualitativament la desintegració és la síntesis teòrica dels treballs de Paraskevas i Holik (Pèlach, 1997) (tractat al capítol 2 d'aquesta tesi).

Per facilitar la discussió dels resultats, s'ha obtingut analíticament l'evolució de les diferents forces implicades en el procés de desintegració, a partir de l'evolució d'aquestes forces amb la consistència, presentada per Paraskevas (1983) d'una forma qualitativa. La taula IV.2.16, reflexa les equacions d'ajust i la gràfica de la figura 4.2.20, la seva evolució. Com es pot veure, es tracta de corbes polinòmiques.



**Figura 4.2.20:** Ajust qualitatiu de l'efecte de la consistència sobre el desfibratge i el consum d'energia.



Taula IV.2.16: Equacions de les corbes d'ajust per les forces de desfibratge en funció de la consistència

Força	Equació	r <sup>2</sup>
<b>F. viscositat i acceleració</b>	$F = 1E-05 \cdot X_m^6 - 0,0005 X_m^5 + 0,0035 X_m^4 + 0,0117 X_m^3 - 0,102 X_m^2 + 0,4008 X_m - 0,0628$	0,9980
<b>F. impacte</b>	$F = 0,0087 X_m^3 - 0,2494 X_m^2 + 1,727 X_m - 0,1709$	0,9443
<b>F. desfibratge total</b>	$F = 3E-06 \cdot X_m^6 - 7E-05 X_m^5 - 0,0001 X_m^4 + 0,0166 X_m^3 - 0,1731 X_m^2 + 1,5557 X_m + 0,0235$	0,9981

De les corresponents equacions es poden calcular els valors relatius de les forces implicades en el procés de desintegració. Els resultats corresponents es mostren a la taula IV.2.17.

Taula IV.2.17: Forces implicades en el procés de desintegració

C %	fi	Valors absoluts		Valors percentuals	
		fva	ft	%fi	%fva
0	0	0	0	0,00%	0,00%
1	1,4	0,1	1,5	93,33%	6,67%
2	2	0,5	2,5	80,00%	20,00%
3	2,8	0,8	3,6	77,78%	22,22%
4	3,2	1,1	4,3	74,42%	25,58%
5	3,5	2	5,5	63,64%	36,36%
6	3,1	2,8	5,9	52,54%	47,46%
7	3,3	4	7,3	45,21%	54,79%
8	2,4	5,2	7,6	31,58%	68,42%
9	1	7,3	8,3	12,05%	87,95%
10	0,5	8,8	9,3	5,38%	94,62%
11	0	10	10	0,00%	100,00%
12	0	10,2	10,2	0,00%	100,00%
13	-	10,5	10,5	0,00%	100,00%
14	-	10,7	10,7	0,00%	100,00%
15	-	11	11	0,00%	100,00%
16	-	11,2	11,2	0,00%	100,00%

Així mateix es mostra la contribució en percentatge de les forces per impacte i les forces per viscositat respecte la força total. Cal tenir en compte que no es tracta de valors absoluts sinó relatius. S'han anomenat a les forces d'impacte ( $f_i$ ), les forces degudes a la viscositat i la acceleració ( $f_{va}$ ) i les forces de desfibratge totals ( $f_t$ ).

Una vegada quantificada la gràfica de Paraskevas, es té una idea relativa de la magnitud de les forces que deuen contribuir a la desintegració, per tant aquestes forces relatives s'haurien de correlacionar amb el  $t_D$  o la inversa del  $t_D$ .

La taula IV.2.18, reflexa l'invers del temps de desintegració i les forces relatives totals per l'interval de fraccions màssiques comprès entre 0,06 i 0,016 / 0,014 i per les dues velocitats de treball. A títol d'exemple es presenta la correlació existent, de tipus logarítmic entre les forces relatives totals i l'invers del temps de desintegració a la gràfica de la figura 4.2.21.

**Taula IV.2.18:** Invers del temps de desintegració ( $\text{min}^{-1}$ ) i forces totals de desintegració pel paper estucat de qualitat PQ a 19rev/s

	$X_m$					
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
$1/t_D$	0,03	0,06	0,13	0,16	0,22	0,30
$f_t$	5,9	7,6	9,3	10,2	10,7	11,2

La representació gràfica dels valors de la taula IV.2.18, mostra una correlació logarítmica entre la força de desintegració descrita per Paraskevas i els temps de desintegració obtinguts experimentalment. Com es pot veure, a mesura que augmenta la força de desfibratge  $f_t$ , el temps de desintegració  $t_D$  es redueix ( $\log^{-1}$ ).

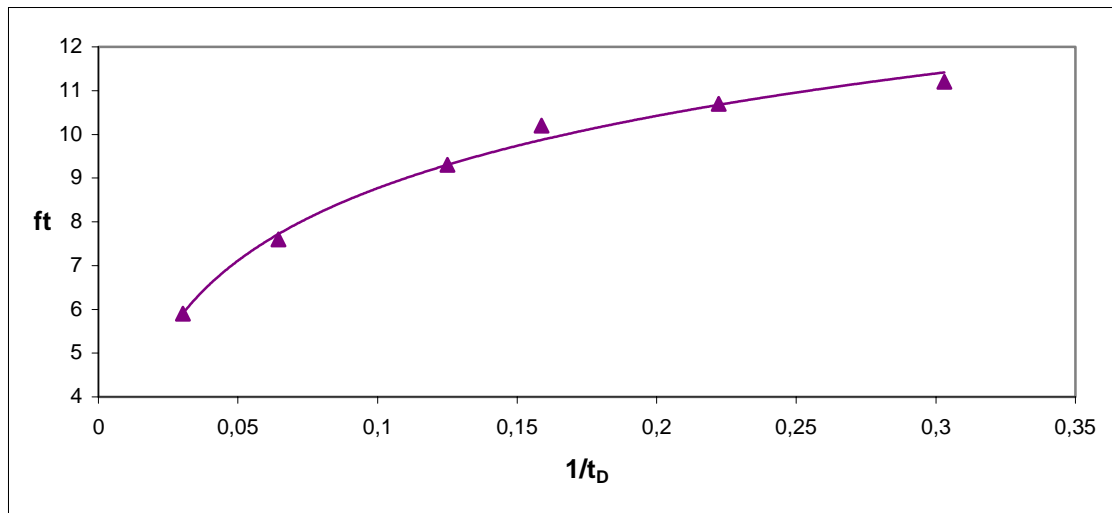


Figura 4.2.21: Correlació entre la força de desfibratge total ( $f_t$ ) i la inversa del temps de desintegració ( $t_D$ ).

Els resultats obtinguts experimentalment i la intensitat relativa de les forces totals mostren la validesa de la teoria de Paraskevas encara que no es disposa del valor absolut de la magnitud de les forces. Caldria esperar que si aquesta correlació s'establís per l'interval de fraccions màssiques de 0,1 ~ 0,16 / 0,14 , la correlació es millorés lleugerament com a conseqüència d'eliminar l'interval de fraccions màssiques en que les forces totals són suma de les d'impacte mecànic ( $f_i$ ) i hidràuliques ( $f_{va}$ ). No obstant no s'ha observat aquesta millora. A la taula IV.19 es presenten les equacions de correlació corresponents a tots els casos estudiats.

Taula IV.2.19: Equacions de les corbes d'ajust per  $f_t$  en funció de  $1/t_D$

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$f_t = 2,3898 \cdot \ln(1/t_D) + 14,270$	0,9918
	PF	$f_t = 2,8196 \cdot \ln(1/t_D) + 13,244$	0,9975
	PR	$f_t = 3,1785 \cdot \ln(1/t_D) + 18,210$	0,9695
26 rev/s	PQ	$f_t = 4,3028 \cdot \ln(1/t_D) + 15,609$	0,9878
	PF	$f_t = 2,8230 \cdot \ln(1/t_D) + 12,561$	0,9862
	PR	$f_t = 4,1916 \cdot \ln(1/t_D) + 18,760$	0,9926

### 4.3. Aspectes energètics

Com s'ha descrit a l'apartat de materials i mètodes, partint dels resultats del consum energètic de les suspensions de paper estucat d'alta qualitat (PQ), de paper revista (PR) i de paper suport per fotocopiadores (PF), s'analitzaran els aspectes energètics del pulpejat i els factors que previsiblement afecten a aquest consum energètic. La taula IV.3.1 mostra l'energia total consumida ( $E_T$ ) i els temps de desintegració ( $t_D$ ) necessaris per assolir un  $I_{SV}$  de 0,01% per cada tipus de paper estudiat.

Taula IV.3.1: Consums energètics  $E_T$  (kJ) i temps de desintegració  $t_D$  (min) per assolir un  $I_{SV}$  de 0,01%.

		$X_m$													
		0,06		0,08		0,10		0,12		0,14		0,16		0,18	
	$\omega_{\text{ROTOR}}$	$E_T$	$t_D$	$E_T$	$t_D$	$E_T$	$t_D$	$E_T$	$t_D$	$E_T$	$t_D$	$E_T$	$t_D$	$E_T$	$t_D$
PQ	19 rev/s	1213	33	731	15,5	464	8	407	6,3	295	4,5	266	3,3	259	2,6
	26 rev/s	561	10	421	6,5	313	4,5	320	4	270	3,2	263	2,7	274	2,3
PF	19 rev/s	601	14	421	7	292	4	245	3	212	2,5	-	-	-	-
	26 rev/s	695	11	472	5	342	3	277	2,4	245	2	-	-	-	-
PR	19 rev/s	1980	50	1375	27	864	14	954	13	976	12	-	-	-	-
	26 rev/s	1249	22	997	14	756	9	785	8	781	7	-	-	-	-

Com es pot observar, tal com passava amb el temps de desintegració, el consum energètic també disminueix a mesura que augmenta la fracció màssica de la suspensió cel·lulòsica (figures 4.3.1 i 4.3.2). Aquest comportament pot semblar estrany, ja que intuïtivament es podria pensar que per major consistència, major és la necessitat energètica per desfibrar.

Aquest és un raonament correcte, però que no es pot desvincular al fet que els temps de desintegració es redueixen dràsticament quan augmenta la fracció màssica de la suspensió. Per tant, l'efecte combinat d'un augment de la consistència amb una caiguda tan marcada del temps de desintegració, té un efecte de disminució de l'energia total consumida per la suspensió. En altres paraules, l'eficàcia energètica del pulpejat és superior per elevades fraccions màssiques.

Aquest comportament té relació amb el que es descrivia en el apartat 4.2.4 a on es detallen les forces que actuen en la desintegració del paper segons Paraskevas (1983). Aquest estudi diu que treballant a altes consistències, les forces totals de desfibratge són elevades, cosa que es tradueix en uns temps de desintegració molt reduïts.

Per altra banda, l'acció conjunta d'una reducció del  $t_D$  i  $E_T$  implica una disminució dels costos de producció, menor demanda energètica i major disponibilitat de la màquina, però un augment dels costos d'instal·lació com a conseqüència de la major potència necessària. Els augments de potència són de l'ordre del 200% en totes les pastes i velocitats d'agitació estudiades. Obtenint, per exemple, uns requeriments de potència de 0,7kW per  $X_m$  de 0,06 i de 1,43 kW per  $X_m$  de 0,18 , pel paper estucat PQ a 19 rev/s. (apartat 4.3.1).

Les reduccions d'energia total consumida pel púlper a mesura que augmenta la fracció màssica, comparant l'energia necessària per desfibrar el paper a la fracció màssica més baixa estudiada i l'energia total a la fracció màssica més elevada, són aquestes: per una velocitat de rotació de 19 rev/s, es té una reducció del 468% pel PQ, una reducció del 283% pel PF i una reducció del 203% pel PR. Pel cas de la velocitat de rotació de 26 rev/s, les reduccions són inferiors, i prenen el valor de 205% pel PQ, 352% pel PF i 160% pel PR. Aquestes caigudes de demanda energètica van acompanyades d'un augment de la producció de la màquina, tal com s'acaba de comentar anteriorment. Aconseguint-se així, que la producció passi de 1,2 kg/pulpejat quan es treballa amb una fracció màssica del 0,06 , a una producció de 3,6 kg/pulpejat quan es treballa a 0,18.

És interessant comentar la influència del tipus de paper a desfibrar sobre la quantitat d'energia requerida per aquesta fi. La taula IV.3.1 mostra que el paper revista PR és el que necessita més energia per ser desfibrat (1980 kJ). Mentre que el paper fotocòpia PF és el que necessita una menor quantitat d'energia per ésser desfibrat, (únicament amb uns 695 kJ),

Per entendre aquest comportament cal fixar-se novament en les propietats intrínseques del paper. El paper de revista és un paper resistent, ja que ha de complir els requeriments de qualitat exigits i a més, està recobert per una capa d'estucat i una pel·lícula de polietilè que li dona les seves qualitats de llisor i brillantor característiques.

El paper fotocòpia, en canvi, és un paper amb molts menys requeriments de qualitat. Per tant, és lògic pensar que aquest últim, necessitarà menys energia per separar les fibres de cel·lulosa que el formen que el paper revista.

Quantitativament, es parlava a l'apartat 4.2 de les capacitats d'hidratació dels tres papers estudiats. En aquesta discussió es va poder observar que el paper fotocòpia PF és el que tenia una major capacitat d'absorbir aigua, per tant és aquest el que té una major facilitat per a desintegrar-se i en conseqüència una menor necessitat d'energia per a ser desfibrat. En l'altre extrem es troba el paper revista PR, amb una capacitat d'hidratació menor i per tant una major necessitat d'energia per desfibrar-lo, tal com es pot comprovar en aquest apartat.

Un darrer punt interessant a exposar, és el fet que tan el paper estucat de qualitat PQ, com el paper de revista PR, precisen una major energia per desfibrar la pasta quan se sotmeten a una velocitat d'agitació inferior. Mentre que això no passa amb el paper fotocòpia PF, el qual es desfibra amb un consum energètic superior quan se'l sotmet a una major agitació. Aquest comportament pot ser degut a la petita diferència de temps existent entre el desfibrat a 19 rev/s i 26 rev/s del paper fotocòpia PF. També és de suposar que per a cada tipus de paper existeix una velocitat de rotor que dona un consum mínim d'energia. Fent l'estudi únicament a dues velocitats diferents no podem conèixer quina és la velocitat òptima, però si podem suposar en vista del comportament observat que per PQ i PR aquesta velocitat és superior a 19rev/s, mentre que per PF és inferior a 26 rev/s ja que per PF el consum energètic és inferior a 19 que a 26 rev/s en comparació a les grans diferències observades pels altres dos papers (taula IV.3.1).

Analitzant d'una manera gràfica els comportaments anteriorment comentats (figura 4.3.1 i figura 4.3.2) es pot constatar, tal i com ja s'havia extret de l'anàlisi de resultats numèrics, que l' $E_T$  disminueix de manera potencial (taula IV.3.2) a mesura que augmenta  $X_m$  i que aquesta evolució és la mateixa tant a una velocitat de 19 rev/s com a 26 rev/s.

També s'ha pogut observar que per cada tipus de paper la diferència entre l'energia consumida a 19 rev/s i a 26 rev/s disminueix progressivament a mesura que augmenta la consistència de la suspensió.

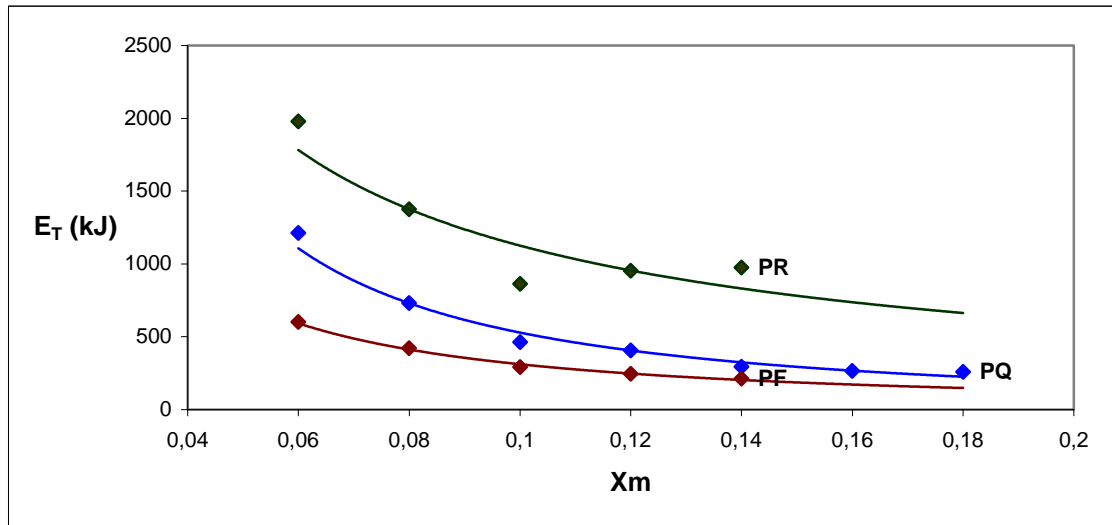


Figura 4.3.1: Energies de desintegració totals de cada paper en funció de la fracció màssica a 19 rev/s.

Es pot concloure que l'evolució de les energies de desintegració de cada paper i a cada fracció màssica es manté en aquest ordre:

$$E_{TD}^{PR} > E_{TD}^{PQ} > E_{TD}^{PF}$$

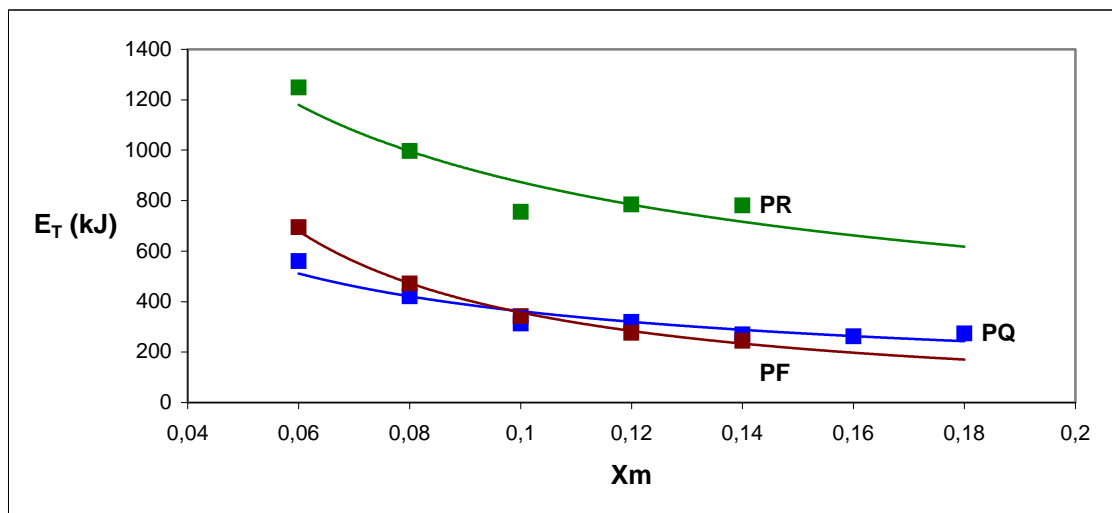


Figura 4.3.2: Energies de desintegració totals de cada paper en funció de la fracció màssica a 26 rev/s.

En tots els casos s'observa una evolució decreixent de tipus potencial de l'energia de desintegració a mesura que augmenta la fracció massica. A la taula IV.3.2 es poden visualitzar les equacions corresponents en funció de cada tipus de paper i la velocitat de rotació.

**Taula IV.3.2:** Equacions de les corbes d'ajust per l'energia total en funció de  $X_m$ .

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$E_T = 17,09 X_m^{-1,2605}$	0,9911
	PF	$E_T = 18,821 X_m^{-1,4485}$	0,9731
	PR	$E_T = 141,75 X_m^{-0,8997}$	0,7727
26 rev/s	PQ	$E_T = 76,249 X_m^{-0,6764}$	0,8975
	PF	$E_T = 19,682 X_m^{-1,2587}$	0,9928
	PR	$E_T = 225 X_m^{-0,5891}$	0,8314

#### 4.3.1. Implementació industrial

Si s'analitza la desintegració des d'un punt de vista industrial, és a dir, pensant en un sistema productiu, s'ha de tenir en compte que les característiques desitjables de qualsevol sistema d'aquest tipus són les que segueixen:

- Un nivell de qualitat de desfibrat determinat
- Una màxima producció.
- Un mínim consum energètic.
- Un mínim temps de funcionament del púlper.

Les dades de partida per l'anàlisi industrial del pulpejat es reflecteixen a les taules IV.3.3 i IV.3.4, on es poden veure els valors de diferents paràmetres relacionats molt directament amb els aspectes econòmics del procés, com són l'energia total consumida en una desintegració ( $E_T$ ), la massa tractada en una desintegració ( $m$ ), el consum específic d'energia (SEC), la producció (PROD) i la potència total necessària ( $P_T$ ). Tot i que aquestes dades es refereixen al púlper de dimensions semiindustrials,



els resultats són traslladables a les dimensions industrials dins un marge de variabilitat acceptable. Els paràmetres esmentats s'han calculat de la següent manera:

$$SEC = \frac{E_T}{m} \quad (kJ / kg) \quad \text{(eq. 4.3.1)}$$

$$PROD = \frac{m}{t_D} \quad (kg / h) \quad \text{(eq. 4.3.2)}$$

$$P_T = \frac{E_T}{t_D} \quad (W) \quad \text{(eq. 4.3.3)}$$

El consum específic d'energia SEC (*Specific Energy Consumption*) que és el consum energètic expressat en kJ/kg de pasta produïda, és una part important del consum energètic del procés i per tant indicador del seu cost.

La producció és el paràmetre que expressa la quantitat de paper que es pot desintegrar en kg per cada hora de funcionament, i per tant defineix la capacitat de produir del sistema, que depèn de la quantitat de paper que s'introdueixi en cada càrrega i del temps necessari per a la desintegració. L'últim paràmetre estudiat és la potència subministrada al púlper, s'expressa en kW i es calcula a partir de la quantitat d'energia que cal subministrar al púlper per unitat de temps.

**Taula IV.3.3:** Caracterització industrial:  $m$ (kg),  $E_T$ (kJ),  $t_D$ (min), PROD(kg/h), SEC(kJ/kg) i  $P_T$ (kW) per la desintegració del PQ, PR i PF a 19 rev/s.

		0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
<b>PQ</b>	<b>m</b>	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6
	<b><math>E_T</math></b>	1213	731	464	407	295	266	259
	<b><math>t_D</math></b>	30	15,5	8	6,3	4,5	3,3	2,6
	<b>SEC</b>	1011	457	232	170	105	83	72
	<b>PROD</b>	2,4	6,2	15,0	22,9	37,3	58,2	83,1
	<b><math>P_T</math></b>	0,7	0,79	0,99	1,07	1,08	1,34	1,43
<b>PR</b>	<b>m</b>	1,2	1,6	2	2,4	2,8	-	-
	<b><math>E_T</math></b>	1980	1375	864	954	976	-	-
	<b><math>t_D</math></b>	50	27	14	13	12	-	-
	<b>SEC</b>	1650	859,4	432	397,5	348,6	-	-
	<b>PROD</b>	1,4	3,6	8,6	11,1	14,0	-	-
	<b><math>P_T</math></b>	0,76	0,85	1,11	1,22	1,47	-	-
<b>PF</b>	<b>m</b>	1,2	1,6	2	2,4	2,8	-	-
	<b><math>E_T</math></b>	601	421	292	245	212	-	-
	<b><math>t_D</math></b>	14	7	4	3	2,5	-	-
	<b>SEC</b>	500,8	263,1	146,0	102,1	75,7	-	-
	<b>PROD</b>	5,1	13,7	30,0	48,0	67,2	-	-
	<b><math>P_T</math></b>	0,72	1,00	1,23	1,36	1,41	-	-

A continuació es mostren els mateixos paràmetres, però estudiats a una velocitat d'agitació de 26 rev/s.

Taula IV.3.4: Caracterització industrial: m(kg), E<sub>T</sub>(kJ), t<sub>D</sub>(min), PROD(kg/h), SEC(kJ/kg) i P<sub>T</sub>(kW) per la desintegració del PQ, PR i PF a 26 rev/s.

		0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	m	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6
	E <sub>T</sub>	561	421	313	320	270	263	274
	t <sub>D</sub>	10	6,5	4,5	4	3,2	2,7	2,3
	SEC	468	263	157	133	96	82	76
	PROD	7,2	14,8	26,7	36,0	52,5	71,1	93,9
	P <sub>T</sub>	0,95	1,08	1,16	1,33	1,5	1,62	1,82
PR	m	1,2	1,6	2	2,4	2,8	-	-
	E <sub>T</sub>	1249	997	756	785	781	-	-
	t <sub>D</sub>	22	14	9	8	7	-	-
	SEC	1040,8	623,1	378,0	327,1	278,9	-	-
	PROD	3,3	6,9	13,3	18,0	24,0	-	-
	P <sub>T</sub>	1.00	1.19	1.51	1.64	1.87	-	-
PF	m	1,2	1,6	2	2,4	2,8	-	-
	E <sub>T</sub>	698	472	346	277	245	-	-
	t <sub>D</sub>	11	5	3	2,4	2	-	-
	SEC	581,7	295,0	173,0	115,4	87,5	-	-
	PROD	6.5	19.2	40.0	60.0	84.0	-	-
	P <sub>T</sub>	1,07	1,57	1,88	1,92	2,02	-	-

#### 4.3.1.1. Consum específic d'energia (SEC)

Com ja s'havia comentat breument en la introducció del present apartat, el SEC és el consum específic d'energia i part important del consum energètic del procés.

En el nostre cas i a partir dels valors numèrics mostrats a la taula IV.3.5, es pot constatar que el valor de SEC disminueix considerablement en augmentar la fracció massica, amb una disminució de l'ordre d'una cinquena part per fraccions massiques elevades respecte les baixes. Aquest estalvi energètic tant sensible amb l'augment de la consistència té una alta repercussió des del punt de vista de costos energètics.

Per tant, es pot afirmar que  $E_T$  disminueix a mesura que augmenta  $X_m$  i el consum específic d'energia encara disminueix més perquè en augmentar  $X_m$ , augmenta la massa de fibres ( $m$ ) de cada desintegració.

**Taula IV.3.5:** Consum específic d'energia (SEC) expressat en kJ/kg per assolir un  $I_{SV}$  màxim del 0,01%.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	$X_m$						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	1011	457	232	170	105	83	72
	26 rev/s	468	263	157	133	96	82	76
PF	19 rev/s	500,8	263,1	146,0	102,1	75,7	-	-
	26 rev/s	581,7	295,0	173,0	115,4	87,5	-	-
PR	19 rev/s	1650	859,4	432	397,5	348,6	-	-
	26 rev/s	1040,8	623,1	378,0	327,1	278,9	-	-

Al comparar els diferents papers s'observa una vegada més que el paper revista PR, és el que presenta més dificultat a l'hora de desintegrar, essent el consum específic d'energia superior a 250 kJ/kg en totes les fraccions massiques estudiades, mentre que amb el paper estucat de qualitat PQ i el paper de fotocòpia PF, a fraccions massiques superiors a 0,10 és aproximadament igual o inferior a aquest valor.

Per altra banda, la taula IV.3.5 mostra la influència de la velocitat d'agitació. Com es pot observar existeix una diferència de SEC entre les dues velocitats estudiades considerable sobretot a  $X_m$  petites. Necessitant d'aquesta manera, una major quantitat d'energia per desintegrar el paper, quan es treballa a velocitats d'agitació inferiors pel

cas del paper de qualitat PQ i del paper revista PR. En canvi, s'ha pogut observar que amb el paper fotocòpia PF succeeix justament el contrari, és a dir, el consum específic d'energia SEC és major quan s'agita la suspensió d'una manera més violenta.

Aquest comportament diferent del paper PF respecte de PQ i PR, que s'observen els valors de SEC també s'ha observat en el consum d'energia total i que està motivat perquè la velocitat òptima de rotor des del punt de vista energètic probablement és diferent per cada paper.

De manera gràfica, les figures 4.3.3 i 4.3.4, mostren les tendències seguides pel consum específic d'energia pels tres papers i les dues velocitats d'agitació estudiades.

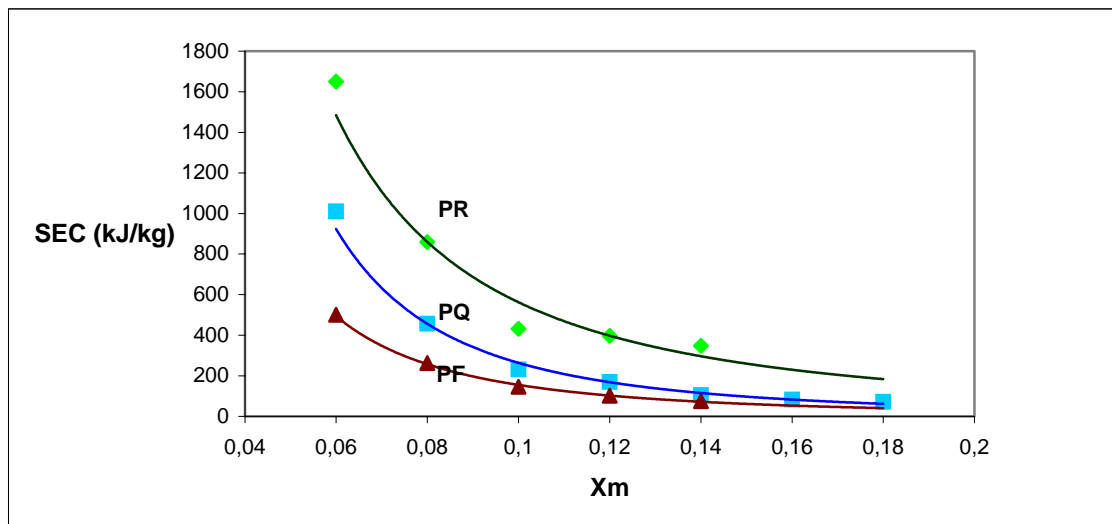
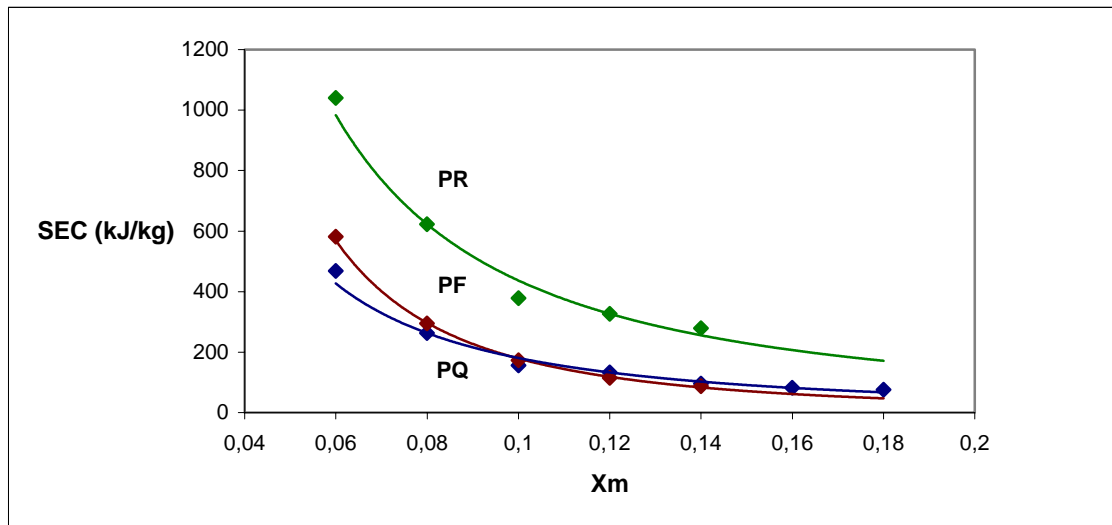


Fig. 4.3.3: SEC de cada paper en funció de la fracció massica a 19 rev/s.



**Fig. 4.3.4:** SEC de cada paper en funció de la fracció massica a 26 rev/s.

A la vista dels resultats de les gràfiques de les figures 4.3.3 i 4.3.4, es pot dir que el SEC disminueix de manera potencial (taula IV.3.6) a mesura que augmenta la fracció massica. Una possible justificació per aquest comportament es basa en l'aspecte de la suspensió. Si es calculen els grams de fibra que hi ha a la suspensió quan la fracció massica es de 0,06, tenim 60g de fibra per 940g d'aigua. En canvi si es calculen els grams de fibra a la suspensió quan la fracció massica és de 0,18, es tenen 180g de fibra per 820g d'aigua.

És important remarcar que tot i que el principal component en totes dues suspensions continua essent l'aigua, a la segona suspensió es té un major percentatge de fibres, per tant cada cop costa més moure-les degut al seu comportament hidrofílic. A baixes concentracions, la cel·lulosa forma ponts d'hidrogen fonamentalment amb les molècules d'aigua del medi, ja que un cop en moviment com a conseqüència de la velocitat del rotor, les fibres es troben molt lluny per unir-se.

Com a resultat d'aquesta acció, les fibres absorbeixen aigua i s'inflen degut al seu comportament fibrilar superficial, que provoca un augment considerable de la seva superfície específica i de la capacitat d'agrumollar-se entre elles. Al augmentar la consistència, les fibres formen una suspensió més espessa, estant per tant molt properes entre elles, la qual cosa fa que augmenti molt la seva capacitat de formar ponts d'hidrogen. D'aquesta manera, les forces de fregament entre les fibres

augmenten considerablement i per tant, el consum energètic disminueix notablement, ja que a l'acció de desintegració del púlper se li afegeix les forces internes de desintegració degudes al fregament entre fibres.

**Taula IV.3.6:** Equacions de les corbes d'ajust de SEC en funció de  $X_m$  a 19 i 26 rev/s.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$SEC = 0,8546 X_m^{-2,2604}$	0,9972
	PF	$SEC = 0,9388 X_m^{-2,4495}$	0,9903
	PR	$SEC = 7,0876 X_m^{-1,8997}$	0,9381
26 rev/s	PQ	$SEC = 3,7773 X_m^{-1,6802}$	0,9820
	PF	$SEC = 0,9793 X_m^{-2,2622}$	0,9981
	PR	$SEC = 11,251 X_m^{-1,6802}$	0,9729

#### 4.3.1.2. Potència consumida

Un aspecte negatiu que s'aprecia en augmentar la fracció màssica és l'augment de la potència que cal per moure la suspensió. Aquesta es pot quantificar en que aproximadament en passar de fracció màssica 0,06 a 0,18 cal duplicar la potència instal·lada, tal com es pot veure a la taula IV.3.7. Aquest aspecte cal tenir-lo present a l'hora de valorar el sistema productiu.

Concretament, els augments de potència són 2,5 pel PQ a 19 rev/s, del 2,1 per aquest mateix paper a 26 rev/s. Pel paper fotocòpia els augments són del 2,0 per les dues velocitats i referent al paper revista els augments continuen essent de 2,0 per les dues velocitats d'agitació estudiades.

Taula IV.3.7: Potència consumida  $P_T$  (kW) per assolir un  $I_{SV}$  màxim del 0,01%.

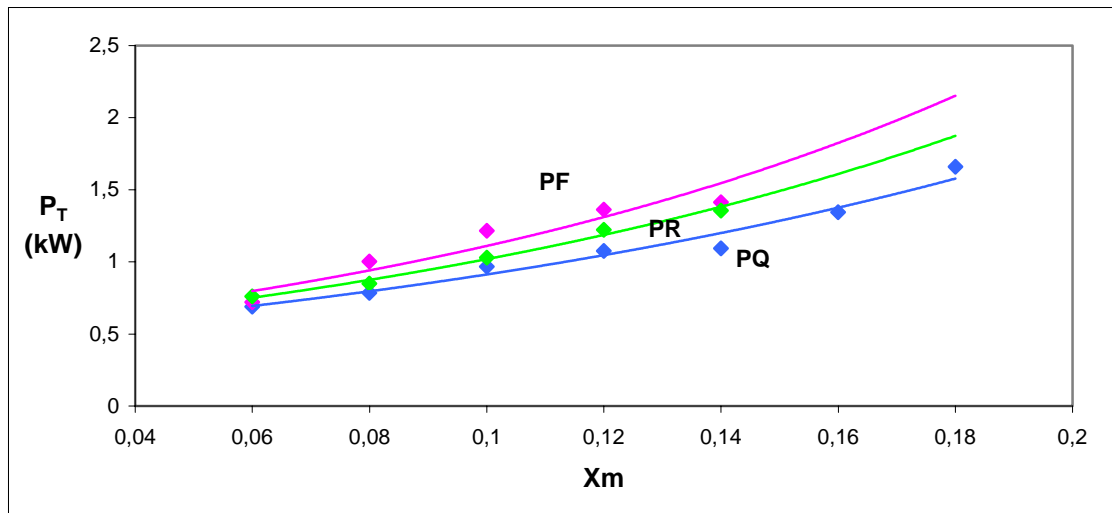
		$X_m$						
Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	0,69	0,79	0,99	1,07	1,08	1,34	1,43
	26 rev/s	0,95	1,08	1,16	1,33	1,5	1,62	1,82
PF	19 rev/s	0,72	1,00	1,23	1,36	1,44	-	-
	26 rev/s	1,07	1,57	1,88	1,92	2,02	-	-
PR	19 rev/s	0,76	0,85	1,11	1,22	1,47	-	-
	26 rev/s	1,00	1,19	1,51	1,64	1,87	-	-

Si es representa gràficament, s'obtenen les figures 4.3.5 i 4.3.6. En aquestes dues gràfiques es pot observar en els tres papers estudiats, que existeix un augment de la potència a mesura que augmenta la fracció màssica de la suspensió cel·lulòsica. Aquest augment és degut a la major presència de fibres en la suspensió, de la menor distància entre elles i de les majors forces d'interacció entre el seus grups funcionals actius.

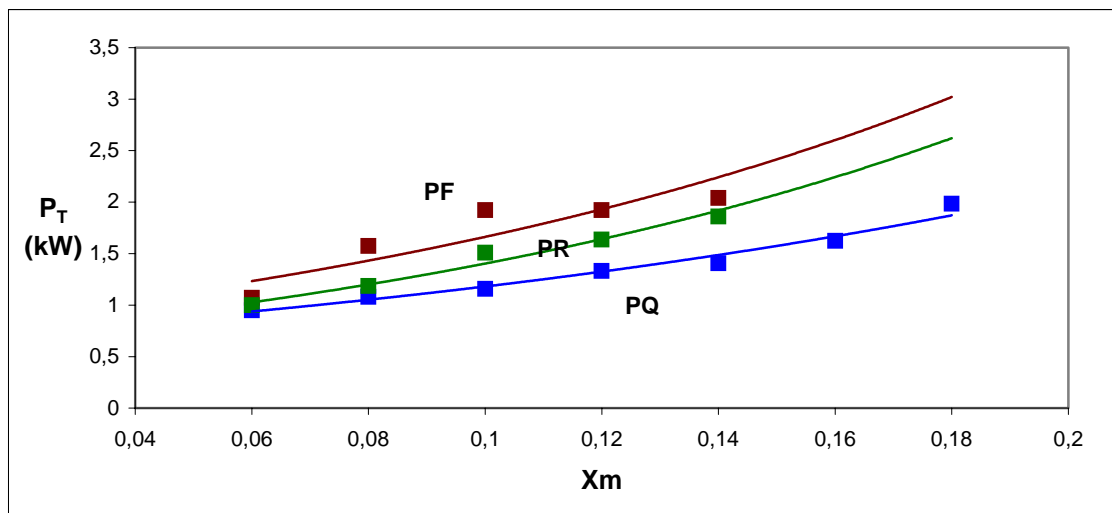
En tots els casos s'observa també una major potència a la velocitat més elevada, en el nostre cas 26 rev/s, fet totalment lògic atès que la potència és proporcional a la velocitat d'agitació del rotor, per major velocitat d'agitació major és la demanda de potència.

Per últim comentar que és el paper fotocòpia PF el que posseeix la demanda de potència més elevada, degut a la quantitat d'energia que precisa en un període de temps tan reduït, li segueix el paper revista PR i per últim el paper estucat de qualitat PQ.





**Figura 4.3.5:** Potència consumida  $P_T$  (kW) per desfibrar cada paper en funció de la fracció màssica a 19 rev/s.



**Figura 4.3.6:** Potència consumida  $P_T$  (kW) per desfibrar cada paper en funció de la fracció màssica a 26 rev/s.

La taula IV.3.8 recull totes les equacions de regressió utilitzades per ajustar les diferents corbes que representen el consum de potència durant el desfibratge dels diferents papers estudiats.

Taula IV.3.8: Equacions de les corbes d'ajust per les diferents tendències trobades.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$P_T = 5,2927 \cdot X_m^{0,7427}$	0,9424
	PF	$P_T = 7,4101 \cdot X_m^{0,8092}$	0,9580
	PR	$P_T = 5,4441 \cdot X_m^{0,7143}$	0,9755
26 rev/s	PQ	$P_T = 5,1045 \cdot X_m^{0,6179}$	0,9290
	PF	$P_T = 9,5168 \cdot X_m^{0,7438}$	0,8794
	PR	$P_T = 8,0338 \cdot X_m^{0,7430}$	0,9876

#### 4.3.2. Caracterització del consum energètic del púlper

Fins ara només s'ha tingut en compte el consum total d'energia per analitzar els aspectes energètics del pulpejat. No obstant, no hi ha dubte que el púlper en buit i funcionant consumeix energia i que no tota l'energia consumida pel desintegrador amb la suspensió es fa servir per desfibrar. Per tant, existeix una quantitat considerable d'energia que es consumeix per donar moviment a les parts mòbils del púlper i una altra part important que es perd en els rodaments i altres parts mecàniques de l'aparell. Tots aquests consums energètics són els que recull el paràmetre  $E_\phi$  (Energia en buit).

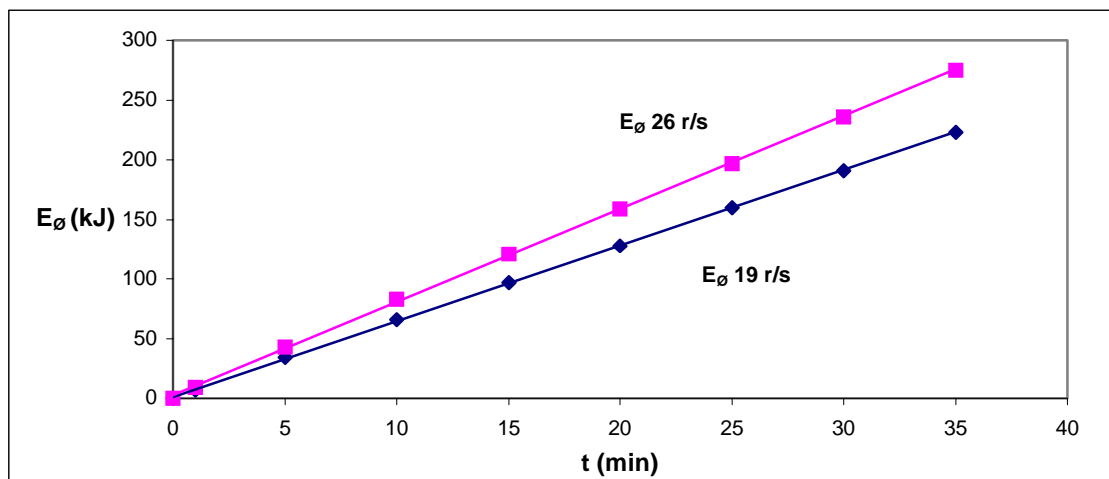
Per aprofundir en els aspectes energètics del pulpejat i poder separar l'energia que es consumeix en l'operació de desfibrar de la que es consumeix en agitació de la suspensió i en moure les parts mecàniques del púlper, s'ha mesurat el consum energètic del púlper en buit en funció del temps, tant a 19 com a 26 rev/s. Aquests consums energètics ( $E_\phi$ ) en funció del temps es reflecteixen a la taula IV.3.9.

**Taula IV.3.9:** Consum energètic en buit en kJ ( $E_{\emptyset}$ ) en funció del temps de funcionament en minuts (t) i de la velocitat del rotor en rev/s ( $\omega_{\text{ROTOR}}$ ).

	t (min)								
$\omega_{\text{ROTOR}}$	0	1	5	10	15	20	25	30	35
19 rev/s	0	25	122	238	349	461	576	688	803
26 rev/s	0	32	155	299	436	572	709	850	990

Segons les dades de la taula IV.3.9, a mesura que augmenta el temps de desintegració el consum energètic del púlper en el buit es va fent cada cop més gran. Aquest comportament s'observa tant per 19 rev/s com per 26 rev/s. Aquest increment és lineal com es pot comprovar a la gràfica de la figura 4.3.7.

També es pot observar que l'energia consumida pel púlper en buit és més elevada a 26 rev/s que a 19 rev/s, comportament normal ja que es necessita més energia per moure el rotor a una velocitat més elevada.



**Figura 4.3.7:** Evolució del consum energètic del púlper en buit respecte el temps de funcionament i la velocitat d'agitació.

Amb les dades obtingudes es pot calcular l'equació de la recta que, per a un determinat temps de pulpejat, dóna el consum d'energia que necessita el púlper per treballar en buit (taula IV.3.10) a 19 i 26 rev/s.

Taula IV.3.10: Equacions de les corbes d'ajust de  $E_\phi$  en funció de t

$\omega$ ROTOR	Equació	$r^2$
19 rev/s	$E_\phi = 6,341 t + 1,319$	0,9999
26 rev/s	$E_\phi = 7,806 t + 2,484$	0,9998

Tal com mostra la taula IV.3.10, les equacions que defineixen el consum energètic del púlder en buit són lineals i creixents amb el temps. Per tant, com que els temps de desintegració disminueixen de manera potencial amb la fracció massica l'energia que es perd per les parts mòbils del púlder durant les desintegracions també decreixerà de manera potencial amb la fracció massica (figura 4.3.8).

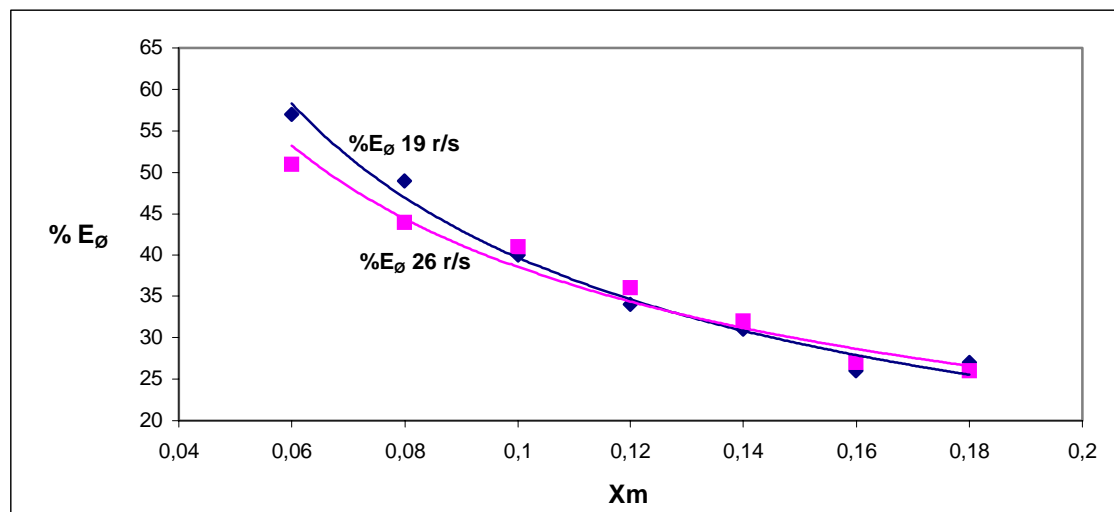


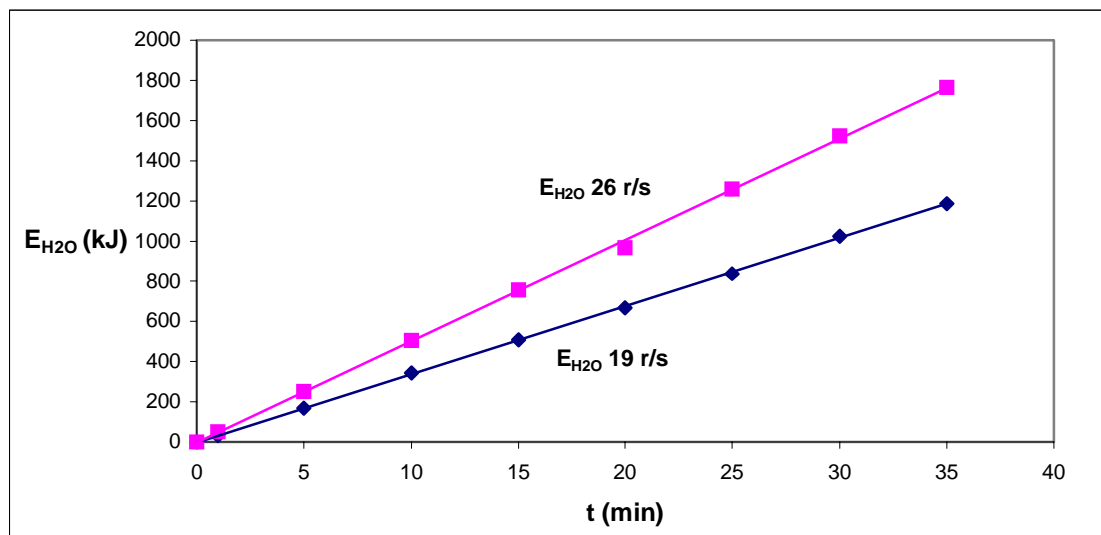
Figura 4.3.8: Evolució del percentatge d'energia total consumida per moure les parts mòbils del púlder.

De la mateixa manera, s'ha mesurat el consum energètic del púlder a 50 °C amb un volum d'aigua equivalent (20 l) al de la suspensió tant a 19 com a 26 rev/s. Els resultats es reflecteixen a la taula IV.3.11. Com en el cas anterior l'energia es mesura en kJ i el temps de funcionament en minuts.

**Taula IV.3.11:** Consum energètic del púlper quan únicament conté aigua a 50°C expressat en kJ ( $E_{H_2O}$ ) en funció del temps de funcionament en minuts (t) i de la velocitat del rotor en rev/s ( $\omega_{ROTOR}$ ).

	t (min)								
$\omega_{ROTOR}$	0	1	5	10	15	20	25	30	35
19 rev/s	0	32	169	342	508	666	839	1026	1188
26 rev/s	0	50	252	504	756	968	1260	1523	1764

Els resultats de la taula IV.3.11, es reflecteixen en la figura 4.3.9. Com es pot observar, l'energia consumida pel púlper amb aigua varia linealment amb el temps de funcionament i és més elevada a 26 rev/s que a 19 rev/s. Aquest és un comportament normal, ja que es necessita més energia per moure el mateix volum d'aigua, a una velocitat més elevada. Cal aclarir que aquesta energia engloba  $E_{\phi}$ , per tant, l'energia transmesa neta a l'aigua es calcula restant de l'energia total transferida a l'aigua les pèrdues mecàniques que es produeixen quan el púlper treballa en buit.

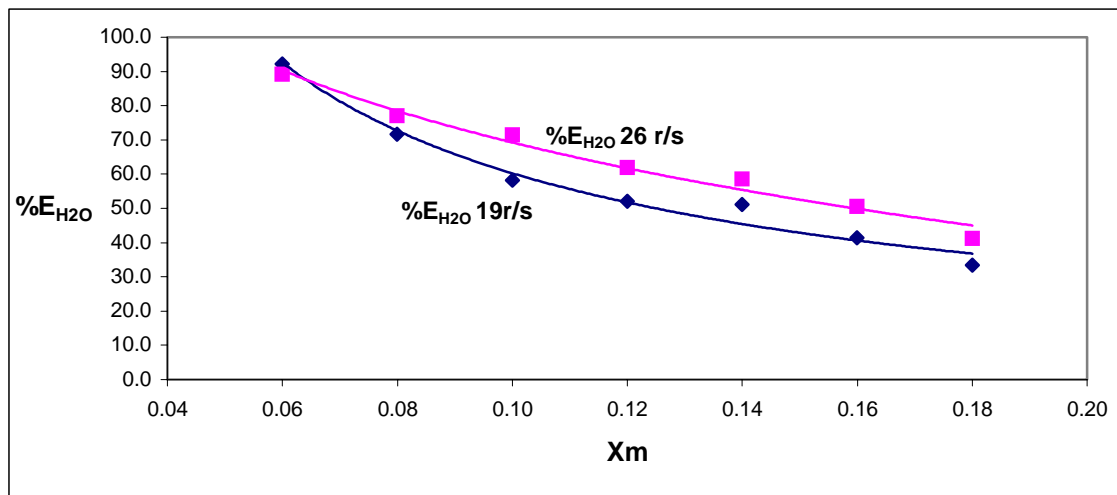


**Figura 4.3.9:** Evolució del consum energètic amb aigua respecte el temps, per cada velocitat d'agitació.

La taula IV.3.12, recull les equacions d'ajust de la gràfica de la figura 4.3.9. Com es pot observar, les rectes d'ajust continuen essent lineals per tant, tal com passava amb les energies al buit  $E_{\phi}$ , la quantitat d'energia transmesa o dissipada a l'aigua es reduirà de manera potencial a mesura que augmenta la fracció massica (figura 4.3.10).

**Taula IV.3.12:** Equacions de les corbes d'ajust per  $E_{H_2O}$  en funció del temps.

$\omega$ ROTOR	Equació	$r^2$
19 rev/s	$E_{H_2O} = 33,933 t - 1,6238$	0,9998
26 rev/s	$E_{H_2O} = 50,392 t - 3,1478$	0,9995



**Figura 4.3.10:** Evolució del percentatge d'energia transferida a l'aigua.

Les expressions anteriors d'energia consumida pel púlper en buit i amb aigua, permeten calcular per les dues velocitats d'agitació, les energies consumides pels diferents temps de desintegració ( $t_D$ ), per cadascuna de les fraccions massiques utilitzades.

**4.3.2.1. Caracterització de l'eficàcia energètica del púlper**

Un altre mètode útil per valorar l'eficàcia energètica de la desintegració està descrit per Amaral et al. (2000) que descriu com mesurar i valorar la fracció d'energia transmesa a la suspensió, que realment és utilitzada per a desfibrar.

La mesura de l'eficàcia energètica es fa mitjançant la relació  $E_{H_2O}/E_T$  que s'obté designant  $E_{H_2O}$  a l'energia consumida per l'aigua per unitat de volum a cada valor de fracció màssica, i  $E_T$  l'energia consumida pel púlper, també per unitat de volum i a cada valor de fracció màssica.

L'esmentat autor suggereix en el seu treball d'investigació que l'eficàcia energètica calculada com s'indica al paràgraf anterior, segueix una evolució lineal decreixent amb la fracció màssica. Aquest comportament queda representat a l'equació 4.3.4.

$$\frac{E_{H_2O}}{E_T} = 1,00 - K \cdot X_m \quad (\text{eq. 4.3.4})$$

En aquesta discussió s'utilitzarà el paràmetre  $\eta_D$  o eficàcia de desintegració i que és el complementari de l'expressió mostrada a l'equació 4.3.5. Es decideix utilitzar aquest paràmetre ja que dóna una informació molt més propera a la realitat que el quocient que defineix Amaral en el seu estudi. Per tant, l'expressió de l'equació 4.3.5 defineix un rendiment energètic que pren el valor de zero quan el púlper està treballant sense fibres, és a dir, amb fracció màssica igual a zero.

$$\eta_D = 1 - \frac{E_{H_2O}}{E_T} = K \cdot X_m \quad (\text{eq. 4.3.5})$$

Aquestes expressions permeten veure que la diferència  $E_T - E_{H_2O}$ , que és l'energia subministrada al púlper, menys l'energia subministrada a l'aigua, per tant la part d'energia que cal subministrar a la suspensió degut a la presència de fibres  $E_{TF}$ , complirà amb la següent expressió:

$$E_{TF} = E_T - E_{H_2O} \quad (\text{eq. 4.3.6})$$

De manera que  $E_{TF}$  és també una recta per a cada fracció màssica, proporcional a l'energia total donada a la suspensió, amb una constant adimensional de proporcionalitat  $K$  que depèn de la matèria fibrosa i que caracteritza l'aptitud d'aquesta a absorbir energia.

Com que per cada assaig es pot constatar que la potència consumida és sensiblement constant al llarg del temps, la expressió (eq. 4.3.4) es pot expressar també com:

$$\frac{E_{H_2O}}{E_T} = \frac{P_{H_2O}}{P_T} = 1,00 - K \cdot X_m \quad (\text{eq. 4.3.7})$$

On  $P_T$  és la potència consumida per la suspensió, i  $P_{H_2O}$  és la potència consumida per un volum d'aigua equivalent al de la suspensió.

Si es representen ara l'eficàcia energètica del nostre pulpejat (figures 4.3.11 i 4.3.12), es pot observar que l'ajust (taula IV.3.13) dóna unes equacions de regressió en consonància a les que Amaral proposava en el seu estudi. És a dir, corbes lineals descendents i amb l'ordenada a l'origen propera a la unitat, ja que significa que la presència de fibres en la suspensió és nul·la, i per tant  $E_{H_2O}$  i  $E_T$  són iguals (segons Amaral). Contràriament, el valor de  $\eta_D$  creix en augmentar l'eficàcia energètica en el pulpejat.

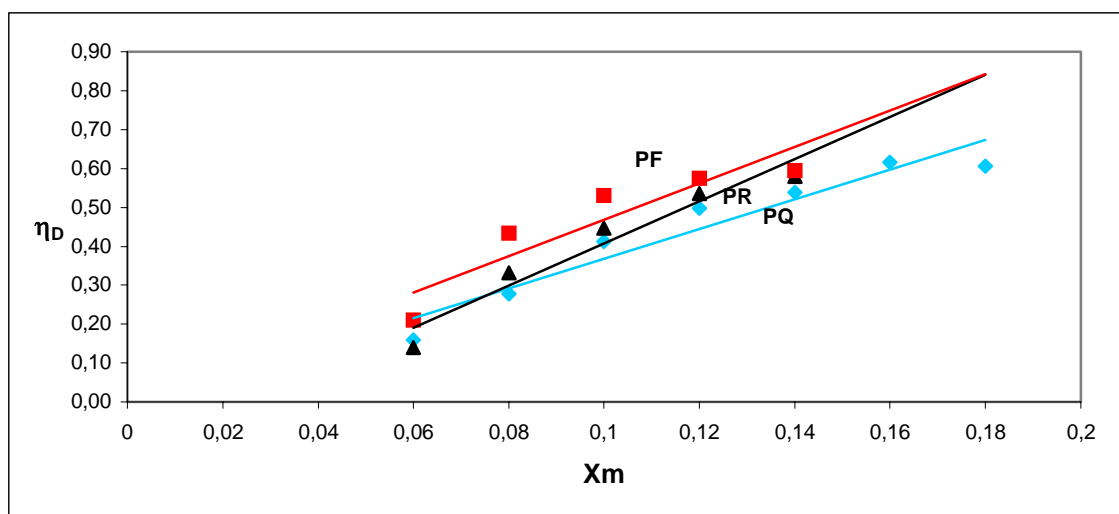


Figura 4.3.11: Rendiment energètic per PQ, PR i PF a 19 rev/s.



El comportament dels tres papers segueix les mateixes tendències, però és important destacar que l'eficàcia energètica és major quan augmenta la fracció massica. Tant a 19 rev/s com a 26 rev/s l'eficàcia energètica de desintegració ( $\eta_D$ ) de cada paper i a cada fracció massica presenta el mateix comportament és a dir:

$$\eta_D^{PQ} < \eta_D^{PR} < \eta_D^{PF}$$

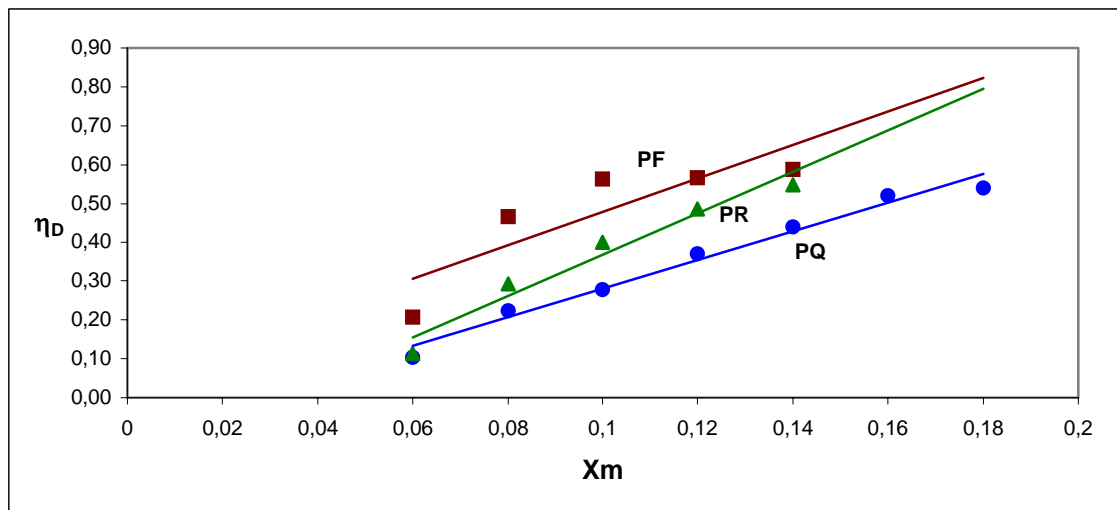


Figura 4.3.12: Rendiment energètic per PQ, PR i PF a 26 rev/s.

En tots els casos s'observa una evolució creixent de tipus lineal de l'eficàcia energètica a mesura que augmenta la fracció massica. A la taula IV.3.13 es poden visualitzar les equacions corresponents per cada tipus de paper i la velocitat de rotació. En aquestes equacions es pot observar que el terme independent és proper a zero en la majoria dels casos, indicant-se d'aquesta manera que per fraccions massiques nul·les, l'eficàcia energètica de desintegració  $\eta_D$  serà zero, ja que en aquest cas al no haver-hi fibres, no s'està desintegrant res.

Taula IV.3.13: Equacions de les corbes d'ajust per  $\eta_D$  en funció de  $X_m$ 

$\omega_{\text{ROTOR}}$	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$\eta_D = 3,8331 \cdot X_m - 0,1358$	0,923
	PF	$\eta_D = 4,551 \cdot X_m + 0,0139$	0,8342
	PR	$\eta_D = 5,4305 \cdot X_m - 0,1358$	0,9399
26 rev/s	PQ	$\eta_D = 3,6935 \cdot X_m - 0,0892$	0,972
	PF	$\eta_D = 4,3179 \cdot X_m + 0,0463$	0,7368
	PR	$\eta_D = 5,3328 \cdot X_m - 0,1648$	0,958

La diferència que s'observa entre les dues velocitats d'agitació coincideix en tots tres papers en que la velocitat més elevada dóna valor lleugerament inferior de la constant de la recta K, indicant que l'aptitud per absorbir energia disminueix en augmentar la velocitat d'agitació per una mateixa fracció màssica. La taula IV.3.14 recull d'una manera més concisa i aclaridora els valors d'aquestes constants per a cada tipus de paper i velocitat d'agitació.

Taula IV.3.14: Valors de K (pendent de la recta de regressió) per PQ, PR i PF a 19 i 26 rev/s.

$\omega_{\text{ROTOR}}$	K		
	PQ	PR	PF
19 rev/s	3,8	5,4	4,6
26 rev/s	3,7	5,3	4,3

Els valors obtinguts mostren una diferència remarcable entre el paper revista PR amb uns valors més alts respecte els altres dos. Això indica que la desintegració del paper revista PR es veu més afavorida a mesura que augmenta la fracció màssica de la suspensió, aconseguint-se d'aquesta manera desintegracions importants quan es treballa a altes consistències.

En cada cas, el pendent K és una constant típica de la matèria primera utilitzada i de les condicions geomètriques del púlper inclosa la velocitat del rotor. Està clar que, a més velocitat, la superfície d'escombrat generada pel rotor en contacte amb la suspensió és superior i per tant la geometria dinàmica del púlper augmenta.

### 4.3.2.2. Caracterització dels diferents paràmetres energètics

Els paràmetres calculats que permeten valorar d'una manera més acurada l'aprofitament d'aquesta energia pel desfibrat són els que segueixen:

$E_{\emptyset}$  Energia de funcionament del púlper en el buit (kJ)

$E_{H_2O}$  Energia de funcionament del púlper contenint únicament aigua (kJ)

$E_T$  Energia total consumida per la suspensió (kJ)

$E_{TF}$  Energia total transferida o dissipada a les fibres (kJ)

$E_{TS}$  Energia total transferida o dissipada a la suspensió (kJ)

$E_{T H_2O}$  Energia total transferida o dissipada a l'aigua (kJ)

La relació que existeix entre ells és la que es mostra a continuació:

$$E_{TS} = E_T - E_{\emptyset} \quad (\text{eq. 4.3.8})$$

$$E_{TF} = E_T - E_{H_2O} \quad (\text{eq. 4.3.9})$$

$$E_{T H_2O} = E_{H_2O} - E_{\emptyset} \quad (\text{eq. 4.3.10})$$

Si s'estudien les expressions anteriors de manera percentual, s'obtenen les expressions que següents:

$$\% E_{TS} = (E_{TS} / E_T) \cdot 100 \quad (\text{eq. 4.3.11})$$

$$\% E_{TF} = (E_{TF} / E_T) \cdot 100 \quad (\text{eq. 4.3.12})$$

$$\% E_{\emptyset} = (E_{\emptyset} / E_T) \cdot 100 \quad (\text{eq. 4.3.13})$$

$$\% E_{H_2O} = (E_{H_2O} / E_T) \cdot 100 \quad (\text{eq. 4.3.14})$$

$$\% E_{T_{H_2O}} = (E_{H_2O} - E_{\emptyset}) / E_T \cdot 100 \quad (\text{eq. 4.3.15})$$

Cal aclarir que  $E_{TF}$  en realitat no és exactament l'energia dissipada per separar les fibres en el procés de desfibrat, ja que és impossible de separar desfibrat i agitació, processos que tenen lloc de manera conjunta.  $E_{TF}$  és doncs l'energia que cal subministrar al púlp a causa de la presència de fibres en l'aigua que conté.

En els apartats que segueixen es mostra un estudi detallat dels consums energètics de cada paper estudiat, així com un estudi conjunt a on s'analitzaran els diferents resultats obtinguts en les anàlisis individuals intentant trobar unes pautes generals de comportament per als tres papers.

Una vegada definits aquests diferents paràmetres o particions energètiques, es caracteritzaran amb detall els tres papers estudiats per tal de conèixer les seves demandes energètiques individuals i poder extreure'n comportaments generals.

#### 4.3.2.2.1. Caracterització energètica del PQ

En aquest subapartat s'estudiaran les diferents variables energètiques acabades de comentar en l'apartat anterior, és a dir l'energia total consumida per la suspensió  $E_T$ , l'energia transferida a la suspensió  $E_{TS}$  i la transferida a les fibres  $E_{TF}$ , de manera absoluta i percentual, pel paper estucat de qualitat. Les taules IV.3.15 i IV.3.16 mostren els consums energètics d'aquest paper a 19 rev/s (taula IV.3.15) i a 26 rev/s (taula IV.3.16).

A la vista dels resultats, s'observa que tan l'energia transferida a la suspensió  $E_{TS}$ , com l'energia transferida a les fibres  $E_{TF}$ , disminueix a mesura que augmenta la fracció màssica. Aquest comportament, al igual que passava amb l'energia total consumida  $E_T$ , es deu a la forta disminució dels temps de desintegració a mesura que augmenta la fracció màssica de la suspensió. És a dir, a mesura que augmenta la consistència de la pasta, també ho fa l'eficàcia del pulpejat i per tant cal menys energia per desintegrar el paper.

En aquest cas, pot resultar més aclaridor fixar-se en els paràmetres percentuals que caracteritzen aquestes variables energètiques. En concret, els paràmetres de  $\% E_{TS}$  i  $\% E_{TF}$ . Aquests donen una idea més acurada de la quantitat d'energia que s'ha transferit a les fibres sobre la quantitat total transmesa. D'aquesta manera, es pot observar que el percentatge d'energia transferida a la suspensió  $\% E_{TS}$  augmenta a mesura que augmenta la fracció màssica. Aquest comportament també s'observa en el percentatge d'energia transferida a les fibres  $\% E_{TF}$ .

Per tant, trobem aquí un nou avantatge al fet de treballar a altes consistències. O sigui, treballant en aquestes condicions, hi ha un aprofitament energètic major. Aquest resultat coincideix amb els que Cherbit et al. (2004) han publicat recentment. Segons les seves investigacions, el quocient de transferència energètica és major quan augmenta la potència aplicada al desfibrat.

Taula IV.3.15: Consums energètics en kJ per la desintegració del PQ a 19 rev/s.

		PQ (19 rev/s)						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
	$X_m$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
	$t_D$	33,0	15,5	8,0	6,3	4,5	3,3	2,6
	$m$	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
Energies	$E_t$	1213,0	731,0	464,0	407,0	295,0	266,0	259,0
	$E_\emptyset$	758,1	358,6	187,4	148,6	107,5	80,1	64,1
	$E_{H_2O}$	1118,2	524,3	269,8	212,2	151,1	110,4	86,6
	$E_{TS}$	454,9	372,4	276,6	258,4	187,5	185,9	194,9
	$E_{TF}$	94,8	206,7	194,2	194,8	143,9	155,6	172,4
	$E_{T H_2O}$	360,1	165,7	82,5	63,6	43,6	30,3	22,5
% Energies	% $E_{TS}$	37,5	50,9	59,6	63,5	63,6	69,9	75,2
	% $E_\emptyset$	62,5	49,1	40,4	36,5	36,4	30,1	24,8
	% $E_{TF}$	7,8	28,3	41,8	47,9	48,8	58,5	66,6
	% $E_{H_2O}$	92,2	71,7	58,2	52,1	51,2	41,5	33,4
	% $E_{T H_2O}$	29,7	22,7	17,8	15,6	14,8	11,4	8,7
SEC	SEC	1010,8	456,9	232,0	169,6	105,4	83,1	71,9
	SEC <sub>TF</sub> <sup>(1)</sup>	79,0	129,2	97,1	81,2	51,4	48,6	47,9
	SEC <sub>TF</sub> /SEC	7,82%	28,27%	41,84%	47,87%	48,79%	58,51%	66,56%

<sup>(1)</sup> Es defineix SEC<sub>TF</sub> com el consum específic d'energia transmès o dissipat a les fibres. Aquest paràmetre es calcula com segueix:

$$SEC_{TF} = \frac{E_{TF}}{m}$$

Taula IV.3.16: Consums energètics en kJ de la desintegració a 26 rev/s per paper PQ.

		PQ (26 rev/s)						
$X_m$		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
$t_D$		33,0	15,5	8,0	6,3	4,5	3,3	2,6
$m$		1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
Energies	$E_t$	561,0	421,0	313,0	320,0	270,0	263,0	274,0
	$E_\emptyset$	285,8	187,4	131,2	117,2	94,7	80,6	69,4
	$E_{H_2O}$	500,8	324,4	223,6	198,4	158,1	132,9	112,8
	$E_{TS}$	$E_{TS}$	275,2	233,6	181,8	202,8	175,3	182,4
	$E_{TF}$	$E_{TF}$	60,2	96,6	89,4	121,6	111,9	130,1
	$E_{T H_2O}$	$E_{T H_2O}$	215,0	137,0	92,4	81,3	63,4	52,3
% Energies	% $E_{TS}$	49,1	55,5	58,1	63,4	64,9	69,3	74,7
	% $E_\emptyset$	50,9	44,5	41,9	36,6	35,1	30,7	25,3
	% $E_{TF}$	10,7	22,9	28,6	38,0	41,4	49,5	58,8
	% $E_{H_2O}$	89,3	77,1	71,4	62,0	58,6	50,5	41,2
	% $E_{T H_2O}$	38,3	32,5	29,5	25,4	23,5	19,9	15,8
SEC	SEC	467,5	263,1	156,5	133,3	96,4	82,2	76,1
	SEC <sub>TF</sub>	50,2	60,4	44,7	50,7	40,0	40,7	44,8
	SEC <sub>TF</sub> /SEC	10,74%	22,95%	28,56%	37,99%	41,44%	49,46%	58,85%

És important comentar que tan el %  $E_{TS}$  i %  $E_\emptyset$ , com %  $E_{TF}$  i %  $E_{H_2O}$  són complementaris, és a dir que la suma d'ells dóna 100. És per això, que s'ha considerat més interessant estudiar únicament les evolucions de  $E_{TS}$  i  $E_{TF}$ .

A continuació es mostren les gràfiques (figura 4.3.13 i 4.3.14), que reuneixen les corbes que representen les evolucions de les diferents variables energètiques en funció  $X_m$  per cadascuna de les velocitats d'agitació estudiades.

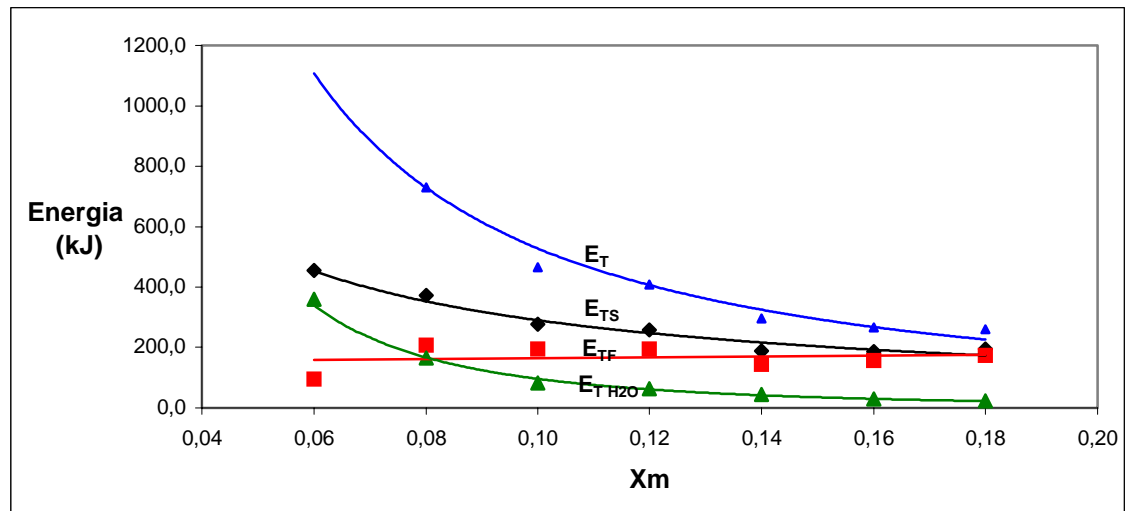


Figura 4.3.13: Energies de desintegració (kJ) del PQ a 19 rev/s.

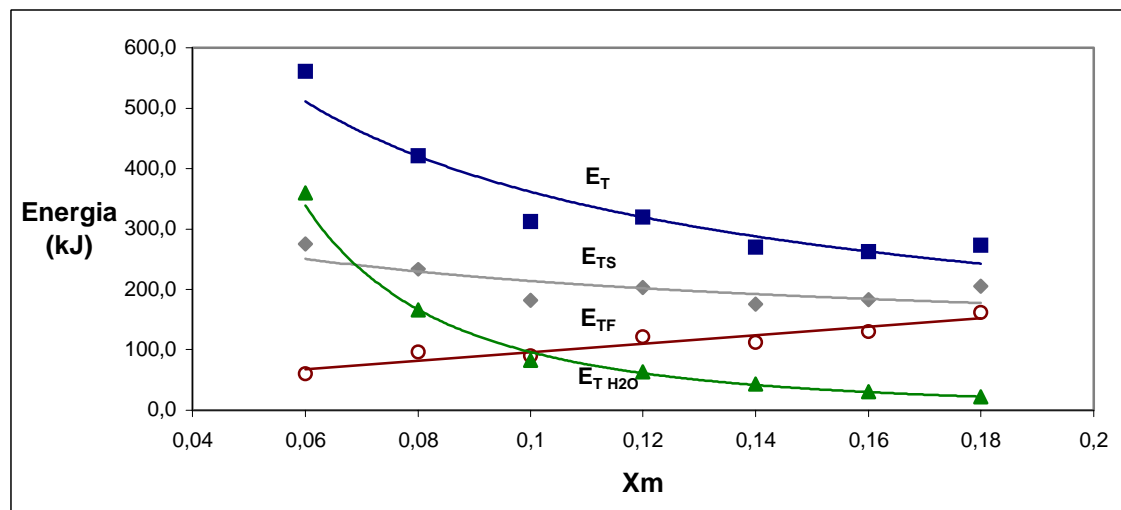


Figura 4.3.14: Energies de desintegració (kJ) del PQ a 26 rev/s.

A partir d'una primera anàlisi, es pot observar que l'energia total consumida  $E_T$  i l'energia dissipada a l'aigua  $E_{TH_2O}$ , independentment de la velocitat d'agitació, disminueixen fortament i de manera potencial a mesura que augmenta la fracció massica (taula IV.3.17). Aquest fet és degut a la forta disminució del temps de desintegració que es produeix quan augmenta la fracció massica. Així mateix, la disminució d'energia continua essent potencial per l'energia dissipada a la suspensió  $E_{TS}$ , però molt menys marcada. En el cas de l'energia dissipada a les fibres  $E_{TF}$ , la



tendència que mostren les corbes traçades és la d'augmentar lleugerament i de manera lineal amb la fracció màssica.

Taula IV.3.17: Equacions de les corbes d'ajust d'energia en funció de  $X_m$ , per PQ.

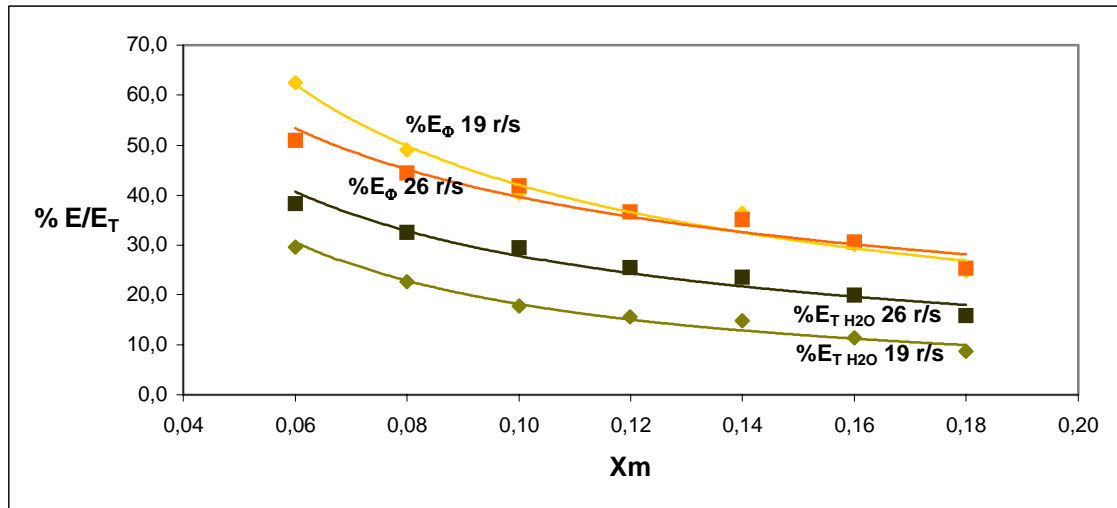
$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	$E_T$	$E_T = 18,821 X_m^{-1,4485}$	0,9731
	$E_{TS}$	$E_{TS} = 38,651 X_m^{-0,8751}$	0,9438
	$E_{TF}$	*	*
	$E_{T H_2O}$	$E_{T H_2O} = 0,322 X_m^{-2,4741}$	0,9947
26 rev/s	$E_T$	$E_T = 76,249 X_m^{-0,6764}$	0,8975
	$E_{TS}$	*	*
	$E_{TF}$	$E_{TF} = 700,97 X_m + 26,029$	0,8806
	$E_{T H_2O}$	$E_{T H_2O} = 0,322 X_m^{-2,4741}$	0,9947

(\*) No s'ha observat correlació

De les gràfiques de les figures 4.3.13 i 4.3.14, es pot observar que per fraccions màssiques baixes, la major energia total necessària per desfibrar el paper  $E_T$  no es correspon amb la major energia dissipada a les fibres  $E_{TF}$ , i per tant és una energia que en la major part es consumeix per les parts mecàniques del púlper  $E_\phi$  i en l'aigua  $E_{H_2O}$ . La figura 4.3.15, mostra de manera gràfica el percentatge d' $E_T$  que es consumeix per moure les pales del púlper o sigui el  $\%E_\phi$ . Com es pot observar, l'energia necessària per agitar les parts mòbils del púlper disminueix a mesura que augmenta la fracció màssica, degut a la forta reducció del temps de desintegració que es produeix quan augmenta la fracció màssica. Per tant, es justifica que l'energia total transferida al púlper  $E_T$  sigui molt més elevada en les primeres fraccions màssiques.

També, es pot constatar, que les energies necessàries per desfibrar el paper són inferiors per velocitats d'agitació majors, això és degut novament al fet que a mesura que augmenten les revolucions del rotor es necessita un menor temps per desintegrar el paper i per tant, una menor quantitat d'energia.

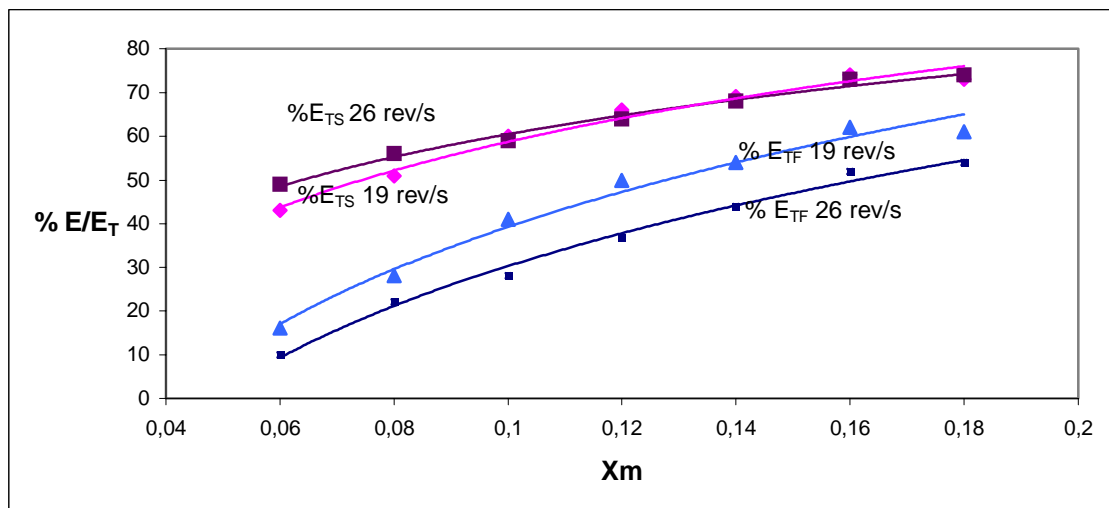
Aprofundint en l'anàlisi energètica, es pot estudiar la porció o percentatge de les diferents variables energètiques acabades de comentar sobre el total d'energia transferida al púlpers  $E_T$ . En primer lloc, si ens fixem en la porció d'energia dissipada per les parts mòbils  $\%E_\phi$  i la dissipada en l'aigua  $\%E_{T\ H_2O}$ , ens adonem que aquest dos percentatges, independentment de la velocitat d'agitació escollida, es redueixen a mesura que augmenta la fracció massica (figura 4.3.15).



**Figura 4.3.15:** Percentatge d'energia dissipada al buit ( $\%E_\phi$ ) i a l'aigua ( $\%E_{T\ H_2O}$ ) per a les dues velocitats d'agitació estudiades pel PQ.

La raó de ser d'aquesta disminució recau novament en el que ja s'havia comentat en la part introductòria d'aquest apartat, a on es descriuen les diferents fraccions d'energia amb les que es pot estudiar aquest procés. Com s'ha dit, les pèrdues mecàniques i l'energia que es transfereix a l'aigua disminueixen a mesura que augmenta la fracció massica, ja que en aquesta situació els temps de desintegració són reduïts.

Estudiant ara el percentatge d'energia total transferida a la suspensió  $\%E_{TS}$  i a les fibres  $\%E_{TF}$  es pot conèixer la influència real que té la velocitat d'agitació sobre aquestes porcions energètiques. La figura 4.3.16, mostra aquests percentatges.



**Figura 4.3.16:** Percentatge d'energia dissipada a la suspensió ( $\%E_{TS}$ ) i a les fibres ( $\%E_{TF}$ ) per a les dues velocitats d'agitació estudiades pel PQ.

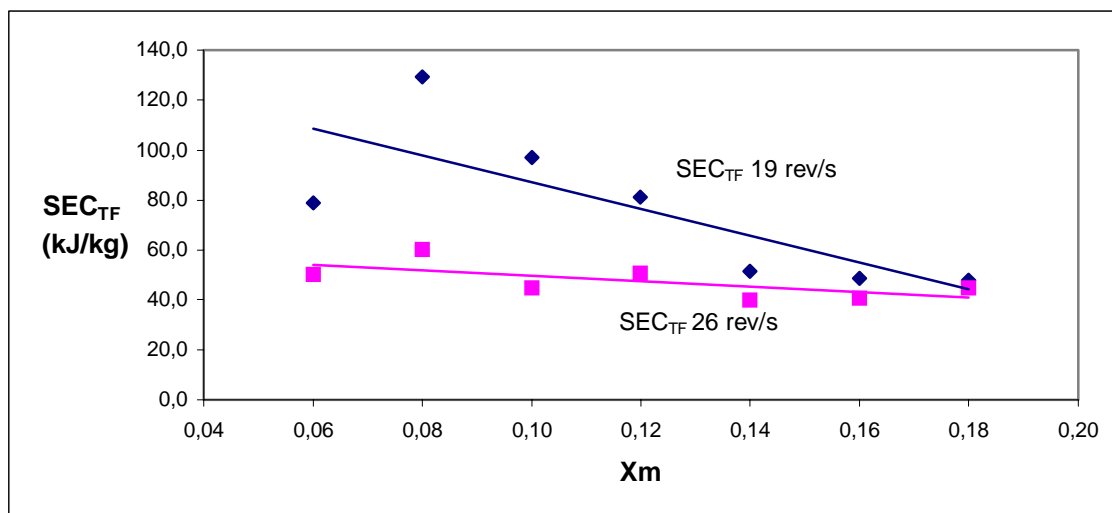
Un primer resultat a comentar és que tan l'energia transferida a la suspensió, com la transferida a les fibres segueixen una mateixa tendència logarítmica creixent a mesura que augmenta la fracció massica (taula IV.3.18). Aquest creixement és fort a la primera part de l'interval i menys marcat a partir de la fracció massica  $X_m$  igual a 0,1. Per tant, a mesura que augmenta la concentració de la pasta, el procés de desfibrat es fa més eficient ja que hi ha un aprofitament energètic major, tal com ja havíem comentat anteriorment.

Un altre aspecte interessant a comentar és que existeix una dependència entre l'energia transferida a les fibres i la velocitat d'agitació, ja que tal i com es pot veure a la gràfica de la figura 4.3.16, l'energia transferida a les fibres  $E_{TF}$  és major quan s'agita la pasta a una menor velocitat de rotació. Aquest fenomen pot ser degut a que treballant a una menor velocitat s'assoleix un estat energètic favorable que fomenta la desintegració del paper PQ.

Taula IV.3.18: Equacions de les corbes d'ajust per % E<sub>TS</sub> i %E<sub>TF</sub> per PQ.

∅ ROTOR	Tipus	Equació	r <sup>2</sup>
19 rev/s	%E <sub>TS</sub>	%E <sub>TS</sub> = 29,398·Ln(X <sub>m</sub> ) + 126,44	0,9882
	%E <sub>TF</sub>	%E <sub>TF</sub> = 43,705·Ln (X <sub>m</sub> ) + 139,95	0,9774
	%E <sub>φ</sub>	%E <sub>φ</sub> = -31,374·Ln (X <sub>m</sub> ) – 28,503	0,9619
	%E <sub>T H<sub>2</sub>O</sub>	%E <sub>T H<sub>2</sub>O</sub> = -21,787·Ln(X <sub>m</sub> ) –9,6825	0,9721
26 rev/s	%E <sub>TS</sub>	%E <sub>TS</sub> = 23,318·Ln(X <sub>m</sub> ) + 114,17	0,9804
	%E <sub>TF</sub>	%E <sub>TF</sub> = 41,188·Ln (X <sub>m</sub> ) + 125,17	0,9917
	%E <sub>φ</sub>	%E <sub>φ</sub> = -17,853·Ln (X <sub>m</sub> ) – 21,732	0,9771
	%E <sub>T H<sub>2</sub>O</sub>	%E <sub>T H<sub>2</sub>O</sub> = -19,436·Ln(X <sub>m</sub> ) –15,987	0,9858

El darrer punt a tractar, és l'estudi del consum específic d'energia SEC. Per dur a terme aquesta anàlisi ens fixarem en l'evolució del consum específic d'energia transferit a les fibres SEC<sub>TF</sub> amb la fracció massica (figura 4.3.17) i, el quocient entre SEC<sub>TF</sub> / SEC amb la fracció massica (figura 4.3.18).

Figura 4.3.17: SEC<sub>TF</sub> de PQ a les dues velocitats d'agitació estudiades.

A la vista del gràfic, es pot observar que el SEC<sub>TF</sub> disminueix amb la fracció massica, però d'una manera molt menys marcada del que ho feia el SEC (figura 4.3.3 i 4.3.4). Aquesta reducció de tipus lineal indica que a mesura que augmenta la fracció massica

cal aplicar una menor quantitat d'energia per unitat de massa al púlper, per tal de desintegrar el paper. El quocient entre  $SEC_{TF}$  i SEC ens ajudarà a quantificar millor aquesta menor tendència a la baixa del  $SEC_{TF}$  en comparació al SEC. La relació entre aquests dos paràmetres és la mostrada al gràfic de la figura 4.3.18.

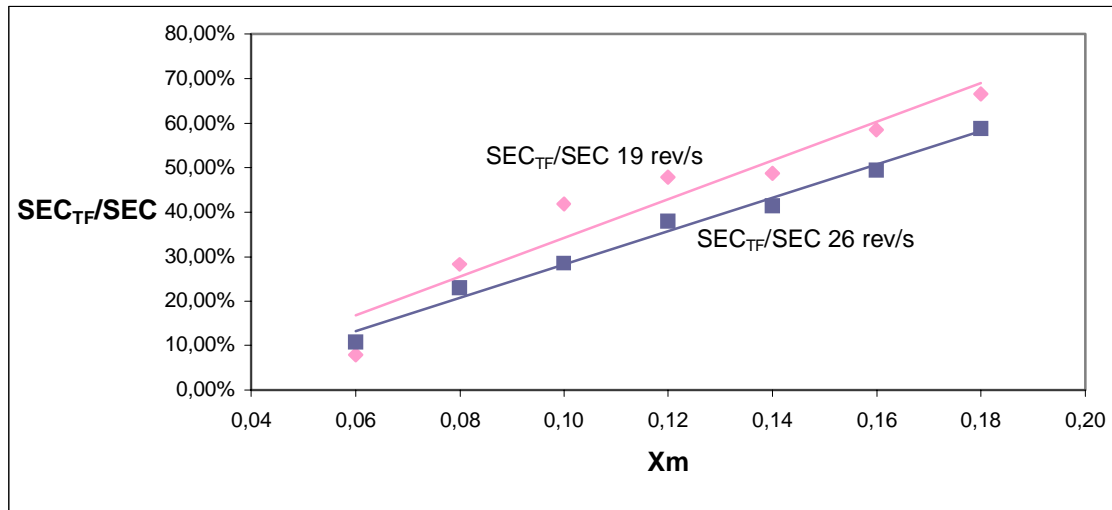


Figura 4.3.18: Quocient entre  $SEC_{TF}$  i SEC de PQ a les dues velocitats d'agitació estudiades.

Com es pot observar, a mesura que augmenta la fracció massica el quocient entre  $SEC_{TF} / SEC$  es va apropant al 100%, indicant que la majoria d'energia transferida la consumeixen les fibres. S'obtenen valors màxims de 66,56% per una agitació de 19 rev/s i de 58,85 a 26 rev/s.

Taula IV.3.19: Equacions de les corbes d'ajust de SEC i  $SEC_{TF}/SEC$  en funció de  $X_m$ , per PQ.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	$SEC_{TF}$	$SEC_{TF} = -535,98 X_m + 140,66$	-
	$SEC_{TF}/SEC$	$SEC_{TF}/SEC = 5,0771 X_m - 0,1585$	0,8688
26 rev/s	$SEC_{TF}$	$SEC_{TF} = -107,81 X_m + 60,268$	-
	$SEC_{TF}/SEC$	$SEC_{TF}/SEC = 3,7547 X_m - 0,0934$	0,9865

#### 4.3.2.2.2. Caracterització energètica del PF

A continuació, es realitzarà el mateix anàlisi energètic sobre el paper fotocòpia PF, per tal de poder conèixer el comportament i evolució de les seves variables energètiques. Però abans de començar qualsevol anàlisi, és interessant descriure les característiques del paper. Aquest, a diferència de l'anterior, és un paper amb unes especificacions de qualitat menors, és menys resistent i té una capacitat d'hidratació major, per tant, és lògic pensar que l'energia necessària per desfibrar-lo és també inferior.

Seguint el mateix plantejament, que en l'apartat anterior (paper PQ) les taules IV.3.20 i IV.3.21 mostren els resultats obtinguts a l'hora de caracteritzar els consums energètics durant el desfibratge de paper fotocòpia. Mostrant-se en funció de la fracció màssica, els temps de desintegració  $t_D$ , l'energia total consumida  $E_T$ , l'energia dissipada al buit  $E_\phi$ , l'energia dissipada pel púlper quan únicament es carrega un volum conegut d'aigua  $E_{H_2O}$ , l'energia neta transferida a l'aigua  $E_{TH_2O}$ , l'energia dissipada en la suspensió  $E_{TS}$ , l'energia dissipada a les fibres  $E_{TF}$  i els seus percentatges, per cada velocitat de rotació estudiada.

Taula IV.3.20: Consums energètics en kJ per la desintegració del PF a 19 rev/s.

		PF (19 rev/s)						
$X_m$		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
$t_D$		14	7	4	3	2,5	-	-
$m$		1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	-	-
Energies	$E_t$	601	421	292	245	212	-	-
	$E_\emptyset$	324	165	96	73	62	-	-
	$E_{H_2O}$	473	236	134	100	83	-	-
	$E_{TS}$	277	256	196	172	150	-	-
	$E_{TF}$	128	185	158	145	129	-	-
	$E_{T H_2O}$	149	71	38	27	21	-	-
% Energies	% $E_{TS}$	46	61	67	70	71	-	-
	% $E_\emptyset$	54	39	33	30	29	-	-
	% $E_{TF}$	21	44	54	59	61	-	-
	% $E_{H_2O}$	79	56	46	41	39	-	-
	% $E_{T H_2O}$	25	17	13	11	10	-	-
SEC	SEC	501	263	146	102	76	-	-
	SEC <sub>TF</sub>	106	116	79	60	46	-	-
	SEC <sub>TF</sub> /SEC	21,22%	43,97%	54,07%	59,11%	60,75%	-	-

Taula IV.3.21: Consums energètics en kJ per la desintegració del PF a 26 rev/s

		PF (26 rev/s)						
$X_m$		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
$t_D$		11	5	3	2,4	2	-	-
$m$		1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	-	-
Energies	$E_t$	698	472	346	277	245	-	-
	$E_\emptyset$	314	145	89	72	61	-	-
	$E_{H_2O}$	551	249	148	118	98	-	-
	$E_{TS}$	384	327	257	205	184	-	-
	$E_{TF}$	147	223	198	159	147	-	-
	$E_{T H_2O}$	237	104	59	46	37	-	-
% Energies	% $E_{TS}$	55	69	74	74	75	-	-
	% $E_\emptyset$	45	31	26	26	25	-	-
	% $E_{TF}$	21	47	57	57	60	-	-
	% $E_{H_2O}$	79	53	43	43	40	-	-
	% $E_{T H_2O}$	34	22	17	16	15	-	-
SEC	SEC	582	295	173	115	88	-	-
	SEC <sub>TF</sub>	122	139	99	66	53	-	-
	SEC <sub>TF</sub> /SEC	21,04%	47,29%	57,22%	57,48%	60,15%	-	-

A la vista dels resultats es pot constatar que les quantitats d'energia consumides per aquest paper són inferiors a les requerides pel desfibrat del paper estucat d'alta qualitat PQ. Aquestes diferències s'accentuen sobretot quan es treballa per baixes consistències.

Les taules IV.3.20 i IV.3.21 també mostren que el comportament de l'energia total consumida pel púlder  $E_T$ , l'energia dissipada a la suspensió  $E_{TS}$  i, l'energia dissipada a l'aigua  $E_{H_2O}$  són pràcticament els mateixos que l'observat en el paper estucat de qualitat PQ. És a dir, a mesura que augmenta la fracció màssica es redueix considerablement la seva demanda energètica. En canvi, el comportament de l'energia transferida a les fibres  $E_{TF}$  és lleugerament diferent, ja que en el paper fotocòpia PF no



s'ha apreciat cap influència de la consistència de la pasta sobre la quantitat d'energia transferida a les fibres. És a dir, l' $E_{TF}$  es manté constant amb  $X_m$ .

La figura 4.3.19 i 4.3.20, mostren de manera gràfica els valors numèrics referents a les energies absolutes  $E_T$ ,  $E_{TS}$ ,  $E_{TF}$  i  $E_{T H_2O}$  mostrats a les taules anteriors (Taules IV.3.20 i IV.3.21). Gràcies a aquesta gràfica es podrà conèixer les tendències que segueixen aquestes energies.

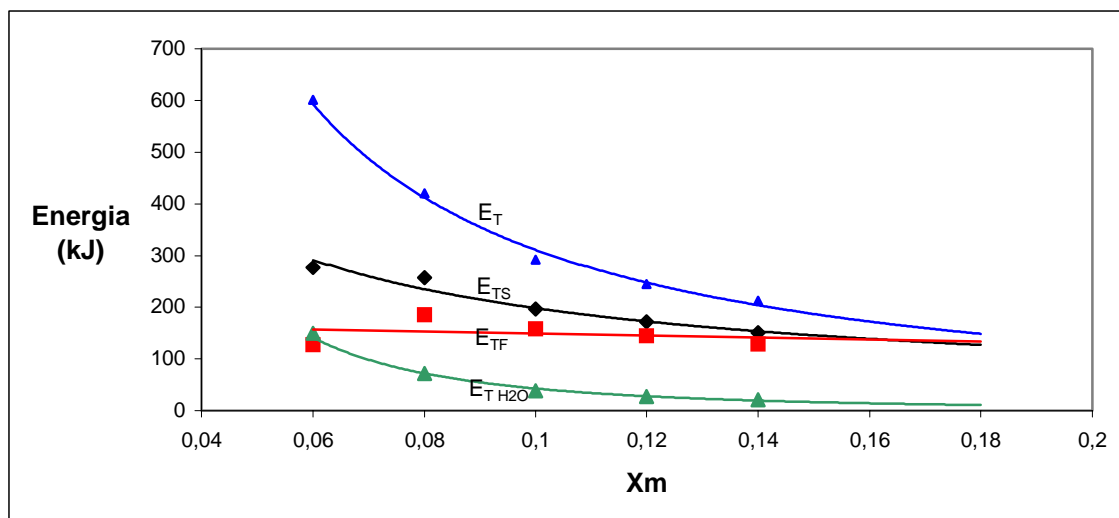


Figura 4.3.19: Energies de desintegració del PF a 19 rev/s.

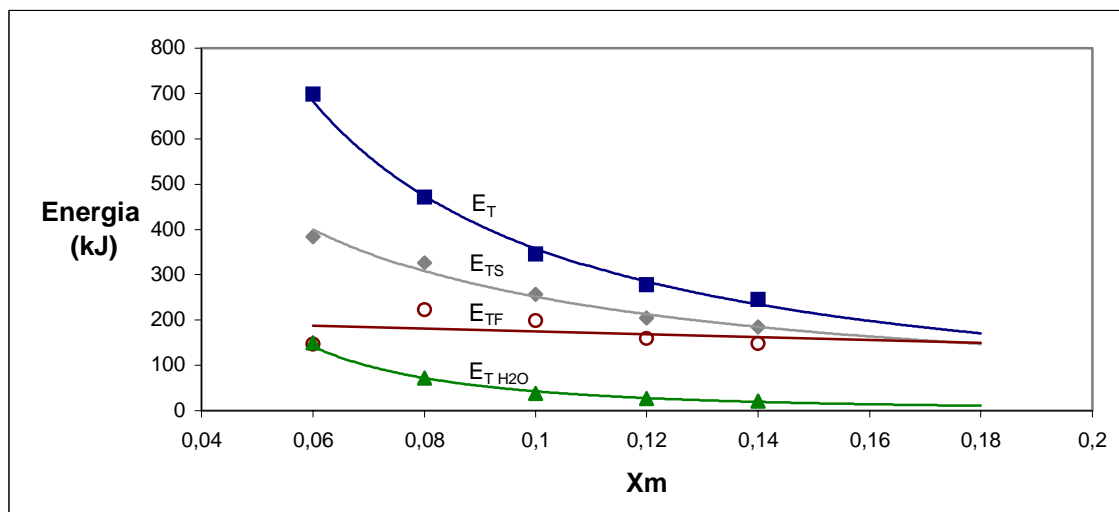


Figura 4.3.20: Energies de desintegració del PF a 26 rev/s.

Com es pot observar, les tendències mostrades a les gràfiques de les figures 4.3.19 i 4.3.20 són pràcticament les mateixes que les del paper estucat de qualitat PQ. Per tant, de forma esquemàtica, l'evolució que segueixen les variables energètiques és aquesta:

- Disminució important de l'energia dissipada al púlper  $E_T$  amb l'increment de la consistència de la pasta.
- Disminució moderada de l'energia dissipada a la suspensió  $E_{TS}$  i a l'aigua  $E_{H_2O}$  amb l'increment de la consistència de la pasta.
- Valor constant de l'energia dissipada a les fibres  $E_{TF}$ , tot i que la consistència de la pasta a desfibrar augmenti. La quantitat d'energia que es transfereix a les fibres és constant i independent a la fracció massica de la suspensió. El seu valor és proper als 149 kJ per una agitació del púlper de 19 rev/s i 271 kJ per una agitació de 26 rev/s.

Totes les equacions de les corbes ajustades mostrades anteriorment i que ens han ajudat a predir les tendències que segueixen aquestes variables energètiques es troben a la taula (IV.3.22).

Com es pot observar, a diferència del paper estucat de qualitat PQ, aquest paper té uns consums energètics, ja siguin els totals  $E_T$  com els transferits a la suspensió  $E_{TS}$ , a l'aigua de la suspensió  $E_{H_2O}$  o a les fibres  $E_{TF}$ , menors quan es treballa a una velocitat d'agitació inferior. Això vol dir que per aquest paper, assoleix el mateix nivell de desfibrat aplicant-li una menor energia quan es treballa a 19 rev/s. Per tant, quan es treballa a 26 rev/s cal subministrar una major quantitat d'energia per aconseguir la mateixa desintegració.

Notis que aquest comportament és just el contrari que el que s'obtenia amb el desfibrat del paper estucat PQ, a on calia sotmetre el paper a una major agitació per tal de reduir el consum energètic necessari per desfibrar-lo. Aquest fet es pot explicar per la gran capacitat d'hidratació que posseeix aquest paper i perquè la velocitat òptima de desintegració des del punt de vista energètic probablement és inferior.

Taula IV.3.22: Equacions de les corbes d'ajust d'energia en funció de  $X_m$  per PF.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	$E_T$	$E_T = 17,09 X_m^{-1,2605}$	0,9911
	$E_{TS}$	$E_{TS} = 34,409 X_m^{-0,7600}$	0,9579
	$E_{TF}$	$E_{TF} = -189,04 X_m + 167,74$	-
	$E_{T H_2O}$	$E_{T H_2O} = 0,1945 X_m^{-2,3408}$	0,9892
26 rev/s	$E_T$	$E_T = 19,588 X_m^{-1,2621}$	0,9938
	$E_{TS}$	$E_{TS} = 30,656 X_m^{-0,9134}$	0,9811
	$E_{TF}$	$E_{TF} = -314,62 X_m + 206,38$	-
	$E_{T H_2O}$	$E_{T H_2O} = 0,1945 X_m^{-2,3408}$	0,9892

Estudiant-ho ara de manera percentual (figura 4.3.21), es pot constatar novament que els percentatges d'energia dissipada al buit  $\%E_\phi$  i dissipada a l'aigua de la suspensió  $\%E_{T H_2O}$ , es redueixen a mesura que augmenta la fracció massica, com a conseqüència de la reducció de temps de desintegració que es produeix amb l'augment de la fracció massica.

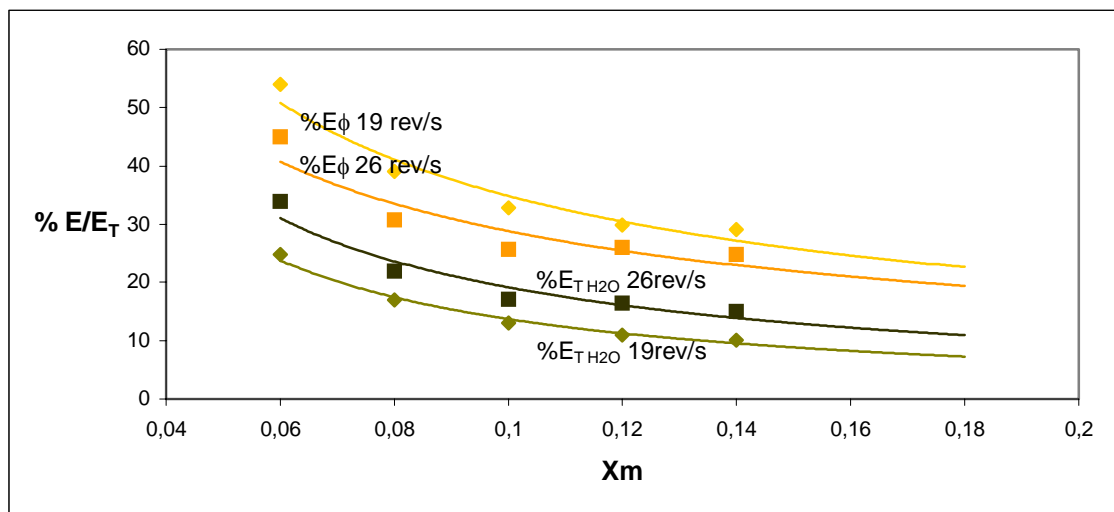
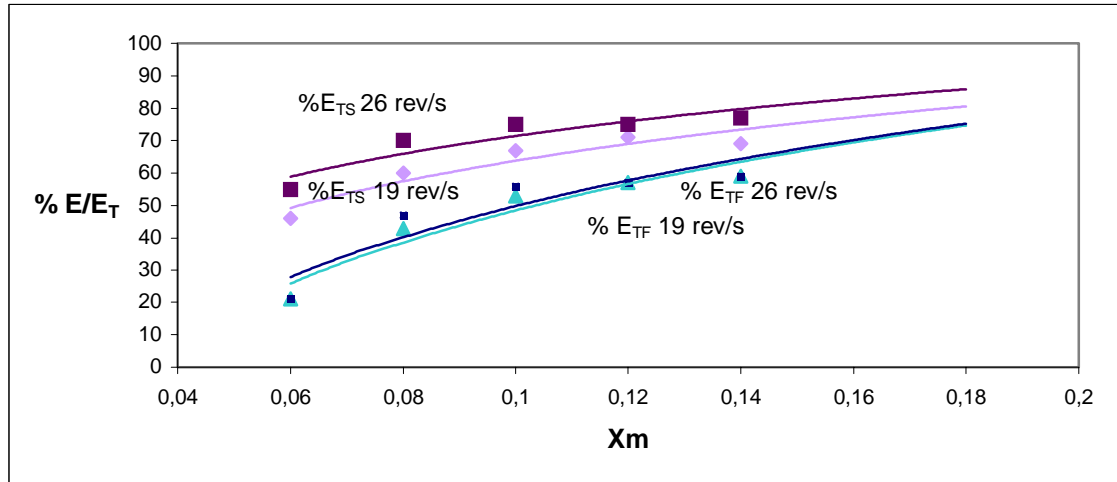


Figura 4.3.21: Percentatge d'energia dissipada al buit ( $\%E_\phi$ ) i a l'aigua ( $\%E_{T H_2O}$ ) per a les dues velocitats d'agitació estudiades pel PF.

Els valors d'energia total consumida transferida a la suspensió  $\%E_{TS}$  i a les fibres  $\%E_{TF}$  són un indicador del quocient de transferència d'energia cap a la suspensió i cap a les fibres. A més, descriu quina és la influència que té la velocitat d'agitació sobre aquestes porcions energètiques. La figura 4.3.22 mostra aquests percentatges.



**Figura 4.3.22:** Percentatge d'energia transferida a la suspensió ( $\%E_{TS}$ ) i a les fibres ( $\%E_{TF}$ ) per a les dues velocitats d'agitació estudiades pel PF.

Com es pot observar en aquest cas, la influència que existia entre la quantitat d'energia que es transferia a les fibres i la velocitat d'agitació observada en el paper estucat de qualitat PQ, és inexistente pel paper fotocòpia PF. Tal com es pot veure a la figura, la corba que representa el  $\%E_{TF}$  a 19 rev/s és pràcticament la mateixa que la del  $\%E_{TF}$  a 26 rev/s.

En canvi, sí que sembla que existeixi una influència en el cas de l'energia transferida a la suspensió, subministrant-se més energia quan es treballa a velocitats de rotació majors. Per tant, l'operació més eficient des d'un punt de vista energètic seria la de pulpejar a 19 rev/s, ja que per menys energia transmesa a la suspensió, es transmet una major part a les fibres.

Totes aquestes corbes presenten les tendències mostrades a les equacions d'ajust que es mostren a la taula IV.3.23, que segueix:

Taula IV.3.23: Equacions de les corbes d'ajust pels % d'energia en funció de  $X_m$ .

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	% $E_\phi$	% $E_\phi = 6,3968 X_m^{-0,7366}$	0,9429
	% $E_{T H_2O}$	% $E_{T H_2O} = 1,1382 X_m^{-1,0803}$	0,9833
	% $E_{TS}$	% $E_{TS} = 29,172 \cdot \ln(X_m) + 131,42$	0,9052
	% $E_{TF}$	% $E_{TF} = 46,562 \cdot \ln(X_m) + 157,04$	0,9196
26 rev/s	% $E_\phi$	% $E_\phi = 6,0677 X_m^{-0,677}$	0,8475
	% $E_{T H_2O}$	% $E_{T H_2O} = 2,1459 X_m^{-0,9495}$	0,9243
	% $E_{TS}$	% $E_{TS} = 29,172 \cdot \ln(X_m) + 122,69$	0,8126
	% $E_{TF}$	% $E_{TF} = 44,392 \cdot \ln(X_m) + 152,76$	0,8424

Per últim ens fixarem en el consum específic d'energia transferit a les fibres  $SEC_{TF}$  i la seva relació amb la fracció màssica (figura 4.3.23). Com es pot observar, es repeteix el comportament observat pel paper estucat de qualitat PQ, el  $SEC_{TF}$  disminueix amb la fracció màssica, però en menor mesura que el SEC. Aquesta disminució indica que amb l'augment de la fracció màssica cal aplicar una menor quantitat d'energia per massa al púlp.

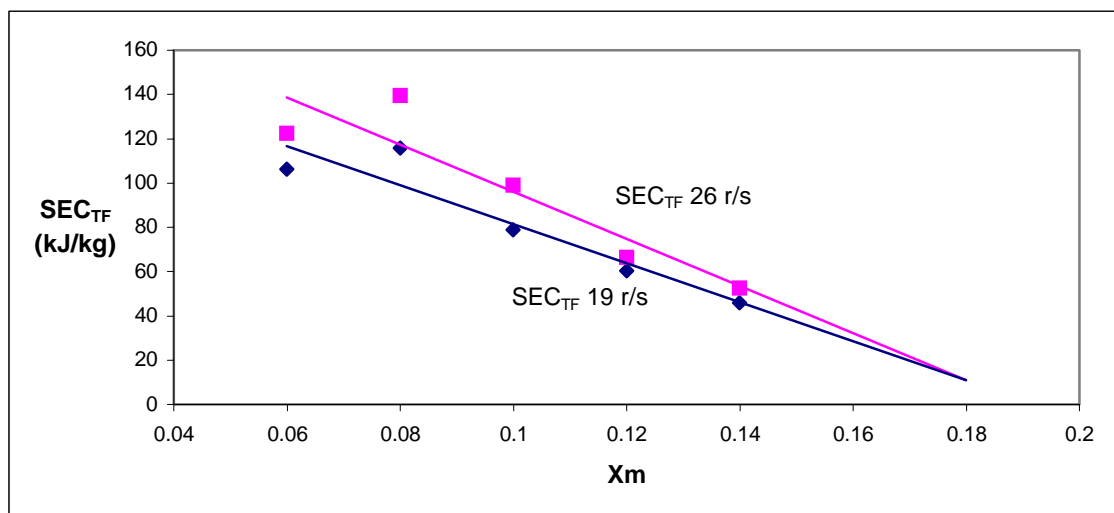


Figura 4.3.23:  $SEC_{TF}$  de PF a les dues velocitats d'agitació estudiades.

El quocient entre  $SEC_{TF}$  i  $SEC$  ens ajudarà a quantificar millor aquesta menor tendència a la baixa del  $SEC_{TF}$  en comparació al  $SEC$ . La relació entre aquests dos paràmetres es la mostrada al gràfic de la figura 4.3.24.

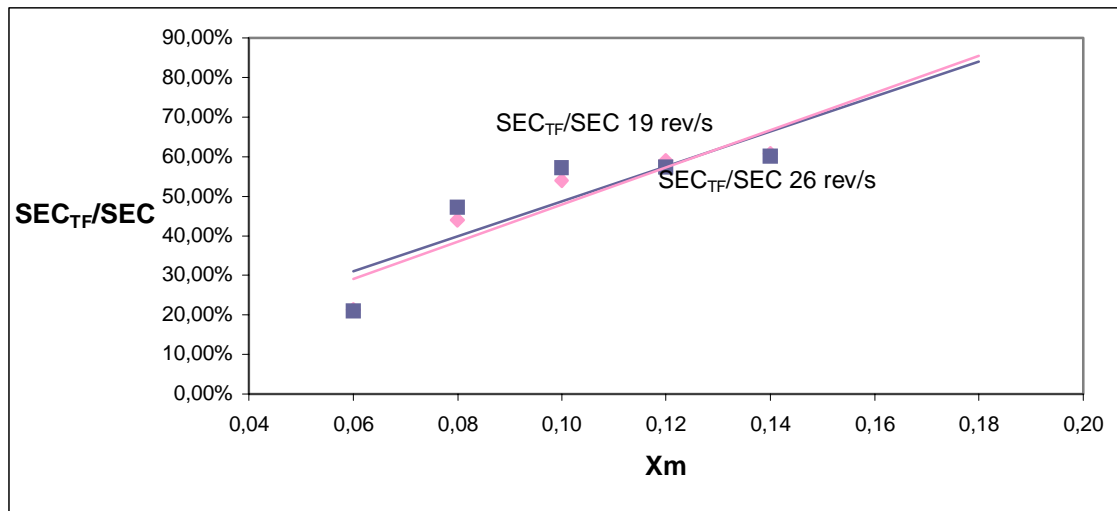


Figura 4.3.24: Quocient entre  $SEC_{TF}$  i  $SEC$  de PF a les dues velocitats d'agitació estudiades.

Aquest quocient és pràcticament el mateix per les dues velocitats d'agitació estudiades, obtenint-se valors màxims de 60,75% per una agitació de 19 rev/s i de 60,15% a 26 rev/s, tal com mostra la figura 4.3.24. Per tant, es pot dir en aquest cas, que la transferència d'energia en el paper fotocòpia PF cap a les fibres de cel·lulosa és independent de la velocitat d'agitació.

Taula IV.3.24: Equacions de les corbes d'ajust de  $SEC$  i  $SEC_{TF}/SEC$  en funció de  $X_m$  per PF.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	$SEC_{TF}$	$SEC_{TF} = -879,74 X_m + 169,43$	0,8850
	$SEC_{TF}/SEC$	$SEC_{TF}/SEC = 4,7099 X_m + 0,0073$	0,8403
26 rev/s	$SEC_{TF}$	$SEC_{TF} = -1063,1 X_m + 202,27$	0,8440
	$SEC_{TF}/SEC$	$SEC_{TF}/SEC = 4,4207 X_m + 0,0443$	0,7460

4.3.2.2.3. Caracterització energètica del PR

El darrer paper estudiat en la nostra discussió és el paper revista PR. Aquest és un paper que posseeix una pel·lícula de polietilè sobre les seves dues cares, la qual li dóna un aspecte brillant i llis. Referent al seu consum energètic, les taules IV.3.25 i IV.3.26 mostren les diferents variables energètiques estudiades, és a dir l'energia total dissipada a la suspensió  $E_T$ , l'energia dissipada a l'aigua de la suspensió  $E_{T H_2O}$ , la dissipada a la suspensió  $E_{TS}$  i la dissipada a les fibres  $E_{TF}$ , de manera absoluta i percentual.

Taula IV.3.25: Consums energètics en kJ per la desintegració del PR a 19 rev/s

		PR (19 rev/s)						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
	$X_m$	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
	$t_D$	50	27	14	13	12	-	-
	$m$	1.2	1.6	2	2.4	2.8	-	-
Energies	$E_t$	1980	1375	864	954	976	-	-
	$E_{\emptyset}$	1146	621	324	302	279	-	-
	$E_{H_2O}$	1695	915	473	440	406	-	-
	$E_{TS}$	834	754	540	652	697	-	-
	$E_{TF}$	285	460	391	514	570	-	-
	$E_{T H_2O}$	549	293	149	138	127	-	-
% Energies	% $E_{TS}$	42	55	62	68	71	-	-
	% $E_{\emptyset}$	58	45	38	32	29	-	-
	% $E_{TF}$	14	33	45	54	58	-	-
	% $E_{H_2O}$	86	67	55	46	42	-	-
	% $E_{T H_2O}$	28	21	17	14	13	-	-
SEC	SEC	582	295	173	115	88	-	-
	SEC <sub>TF</sub>	237	288	195	214	204	-	-
	SEC <sub>TF</sub> /SEC	14,39%	33,49%	45,20%	53,93%	58,45%	-	-

Taula IV.3.26: Consums energètics en kJ per la desintegració del PR a 26 rev/s

		PR (26 rev/s)								
$X_m$		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18		
$t_D$		22	14	9	8	7	-	-		
$m$		1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	-	-		
Energies	$E_t$	1249	997	756	785	781	-	-		
	$E_{\emptyset}$	623	398	258	230	201	-	-		
	$E_{H_2O}$	1105	702	450	400	350	-	-		
	$E_{TS}$	626	599	498	555	580	-	-		
	$E_{TF}$	144	295	306	385	431	-	-		
	$E_{T H_2O}$	482	304	193	170	148	-	-		
% Energies	% $E_{TS}$	50	60	66	71	74	-	-		
	% $E_{\emptyset}$	50	40	34	29	26	-	-		
	% $E_{TF}$	11	30	40	49	55	-	-		
	% $E_{H_2O}$	89	70	60	51	45	-	-		
	% $E_{T H_2O}$	39	31	25	22	19	-	-		
SEC	SEC	1041	623	378	327	279	-	-		
	SEC <sub>TF</sub>	120	184	153	160	154	-	-		
	SEC <sub>TF</sub> /SEC	11,49%	29,55%	40,43%	49,05%	55,24%	-	-		

Com es pot observar comparant les taules del consum energètic d'aquest paper, amb els resultats obtinguts amb l'anàlisi del paper estucat de qualitat PQ (taula IV.3.15 i IV.3.16) i el paper fotocòpia PF (taula IV.3.20 i IV.3.21), es pot constatar que és el paper revista PR el que precisa d'una major quantitat d'energia per ser desfibrat.

Cal recordar, que és precisament aquest paper el que té una capacitat d'hidratació menor (apartat 4.1) per tant, és lògic que necessiti una major energia la seva operació de pulpejat.

Les tendències que marquen els consums energètics mostrades a les taules IV.3.25 i IV.3.26 són les representades a les figures 4.3.25 per una velocitat d'agitació de 19 rev/s i a la figura 4.3.26 per una velocitat d'agitació de 26 rev/s.



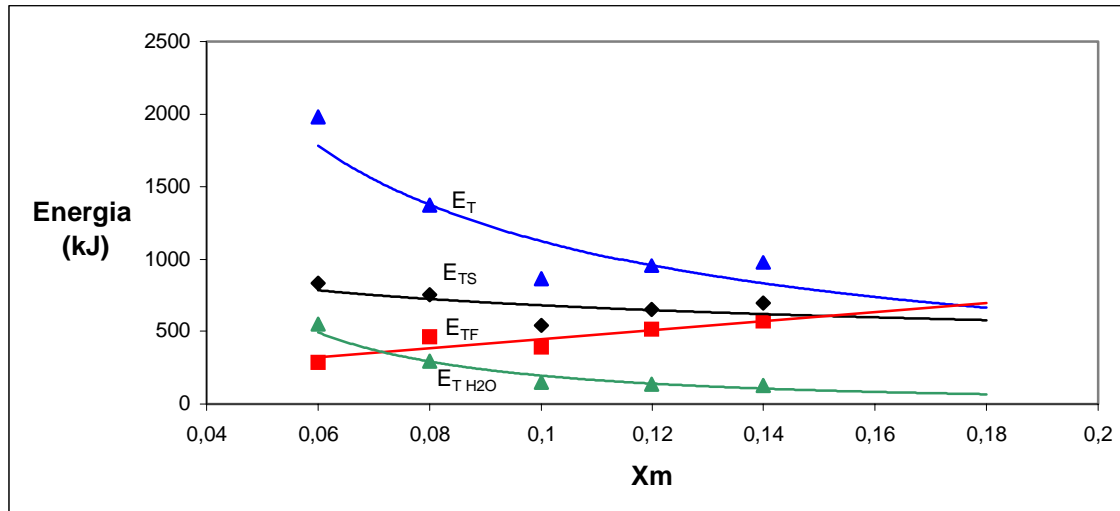


Figura 4.3.25: Energies de desintegració del PR a 19 rev/s.

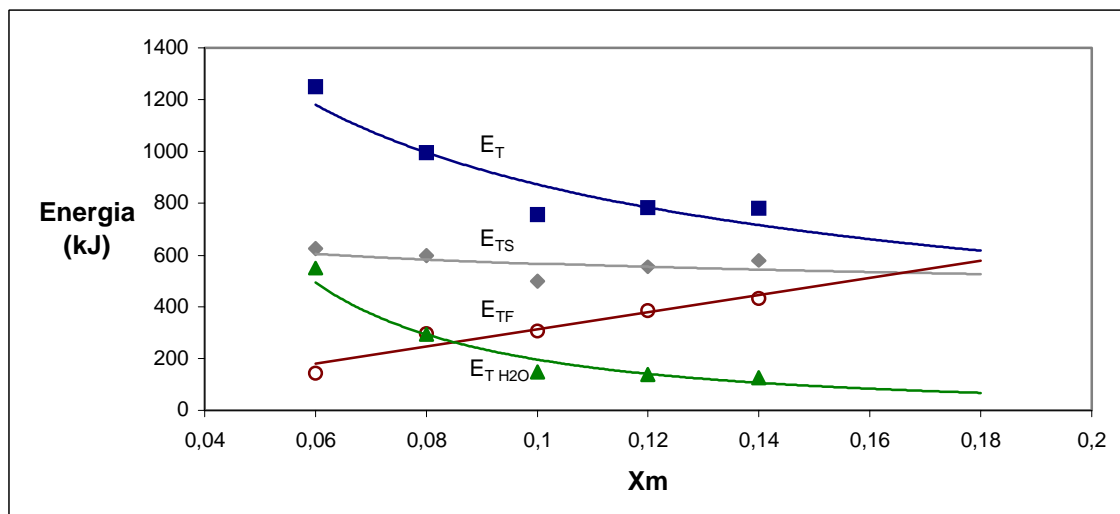


Figura 4.3.26: Energies de desintegració del PR a 26 rev/s

En aquest cas, les tendències que recullen les gràfiques de les figures 4.3.25 i 4.3.26 mostren, tal com ha passat en els altres dos papers estudiats, que existeix una disminució important d'energia total consumida pel púlper ( $E_T$ ) a mesura que augmenta la fracció massica. També s'observa una caiguda de l'energia dissipada a la suspensió  $E_{TS}$  i l'energia dissipada a l'aigua de la suspensió  $E_{H_2O}$  amb la fracció massica, però aquesta és molt menys accentuada que l' $E_T$ . En darrer lloc, l'energia dissipada a les fibres  $E_{TF}$  augmenta sensiblement a mesura que ho fa la fracció massica.

És interessant remarcar que aquest augment és molt més acusat que el del paper estucat de qualitat PQ, el qual experimenta un lleuger augment de l' $E_{TF}$  amb la fracció màssica, i que el del paper fotocòpia PF que pràcticament es manté constant amb la fracció màssica.

Aquest comportament dispar de l'energia dissipada a les fibres  $E_{TF}$  pels tres papers estudiats és totalment lògic ja que al tractar-se de papers diferents, és comprensible que cadascun d'ells tinguin un consum propi i únic. D'aquesta manera, el paper que experimenta un major increment de la  $E_{TF}$  amb la fracció màssica és el paper revista PR, seguit del paper estucat d'alta qualitat PQ i per últim del paper fotocòpia PF.

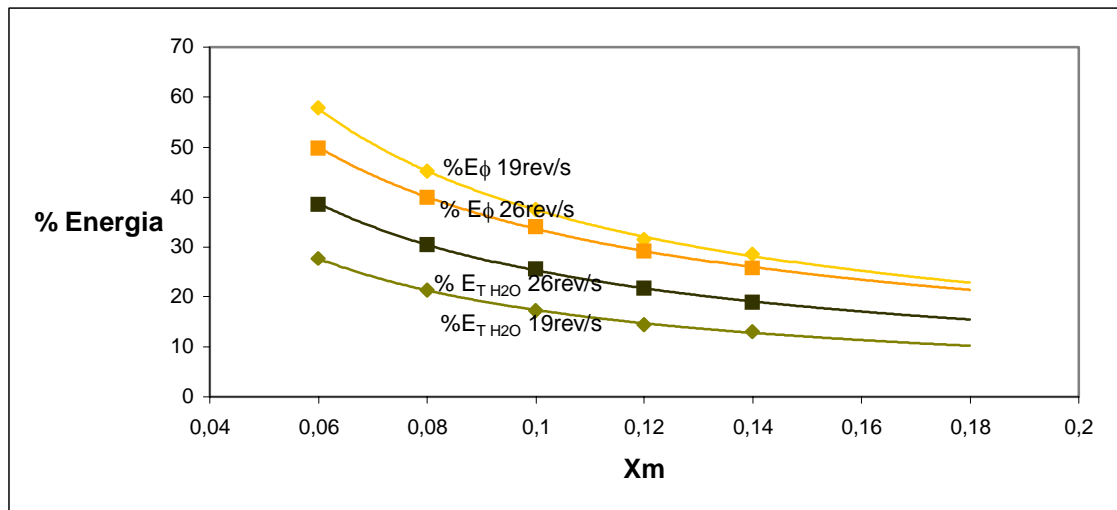
Una possible explicació per aquest comportament és la composició interna de cadascun dels papers estudiats. Per una banda, tant el paper estucat d'alta qualitat com el paper revista són uns papers amb un alt contingut de contaminants: tintes, càrregues, capes d'estucat, etc., els quals podrien intervenir d'alguna manera en el fenomen de la desintegració i influir sobre la quantitat d'energia transferida a les fibres a mesura que augmenta la seva presència. Evidentment a mesura que augmenta la fracció màssica, també ho fa la càrrega de contaminants continguts en la pasta. En canvi, el paper fotocòpia, amb una càrrega de contaminants inferior, sembla ser inalterable amb l'increment de la fracció màssica.

La taula IV.3.27, que es mostra a continuació, recull les diferents equacions d'ajust per les diferents corbes de les gràfiques 4.3.25 i 4.3.26.

**Taula IV.3.27:** Equacions de les corbes d'ajust d'energies en funció de  $X_m$  per PR

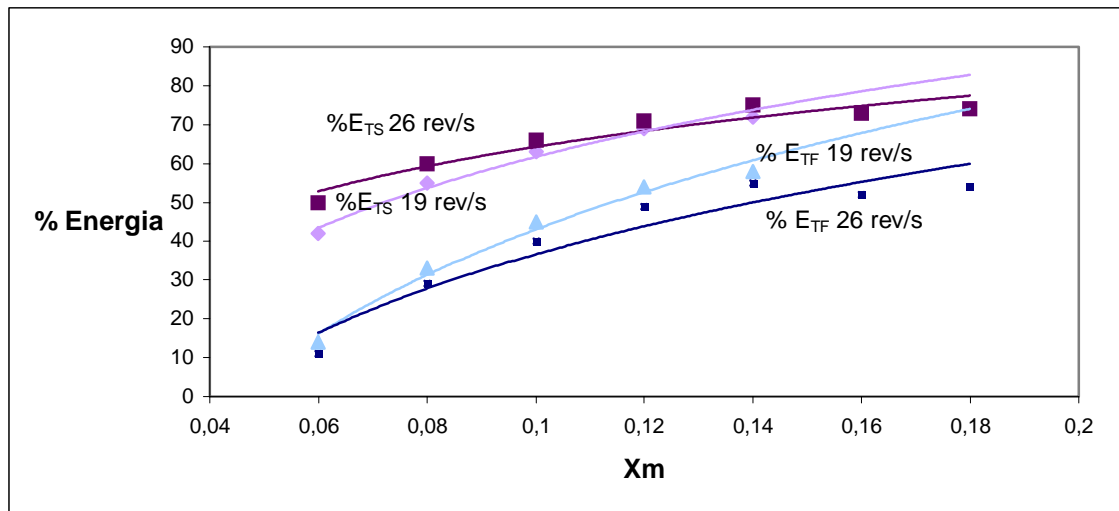
$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	$E_T$	$E_T = 141,75 X_m^{-0,8997}$	0,7727
	$E_{TS}$	$E_{TS} = 360,09 X_m^{-0,2761}$	-
	$E_{TF}$	$E_{TF} = 3124,9X_m + 131,69$	0,7912
	$E_{T H_2O}$	$E_{T H_2O} = 3,0336 X_m^{-1,8089}$	0,9263
26 rev/s	$E_T$	$E_T = 225 X_m^{-0,5891}$	0,8314
	$E_{TS}$	$E_{TS} = 420,54 X_m^{-0,1296}$	-
	$E_{TF}$	$E_{TF} = 3330,6 X_m - 21,012$	0,9184
	$E_{T H_2O}$	$E_{T H_2O} = 3,0336 X_m^{-1,8089}$	0,9263

Realitzant el mateix estudi, però ara de manera percentual, s'obté la gràfica que es mostra a la figura 4.3.27. Com es pot observar, les tendències mostrades són similars pels tres papers estudiats. És a dir, els percentatges d'energia dissipada al buit  $\%E_{\phi}$  i dissipada a l'aigua de la suspensió  $\%E_{H_2O}$ , es redueixen a mesura que augmenta la fracció massica, degut a la reducció del temps de desintegració que es produeix amb l'augment de la fracció massica.



**Figura 4.3.27:** Percentatge d'energia dissipada al buit ( $\%E_{\phi}$ ) i a l'aigua ( $\%E_{T H_2O}$ ) per a les dues velocitats d'agitació estudiades pel PR.

L'evolució dels percentatges d'energia dissipada a la suspensió  $\%E_{TS}$  i a les fibres  $\%E_{TF}$  són els mostrats a la gràfica de la figura 4.3.27. Com es pot veure, el consum energètic del paper revista està fortament influenciat per la velocitat d'agitació del rotor. En concret, es pot constatar que amb una velocitat d'agitació inferior (19 rev/s) es transfereix una major quantitat d'energia a la suspensió fibrosa i a les fibres de cel·lulosa, a més per aquesta velocitat d'agitació, la quantitat d'energia transferida és més sensible a la fracció massica, augmentant d'una manera més marcada.



**Figura 4.3.28:** Percentatge d'energia transferida a la suspensió (%E<sub>TS</sub>) i a les fibres (%E<sub>TF</sub>) per a les dues velocitats d'agitació estudiades pel PR.

Totes aquestes corbes presenten tendències de tipus logarítmic. Les equacions d'ajust es mostren a la taula IV.3.28 que segueix:

**Taula IV.3.28:** Equacions de les corbes d'ajust de % d'energies en funció de X<sub>m</sub> per PR.

ω ROTOR	Tipus	Equació	r <sup>2</sup>
19 rev/s	%E <sub>φ</sub>	$\%E_{\phi} = 5,3531 X_m^{-0,8451}$	0,9986
	%E <sub>T H2O</sub>	$\%E_{T H2O} = 2,1401 X_m^{-0,8376}$	0,9996
	%E <sub>TS</sub>	$\%E_{TS} = 35,742 \cdot \ln(X_m) + 144,15$	0,9846
	%E <sub>TF</sub>	$\%E_{TF} = 52,742 \cdot \ln(X_m) + 164,51$	0,9836
26 rev/s	%E <sub>φ</sub>	$\%E_{\phi} = 5,6611 X_m^{-0,677}$	0,8475
	%E <sub>T H2O</sub>	$\%E_{T H2O} = 2,2401 X_m^{-0,9092}$	0,9983
	%E <sub>TS</sub>	$\%E_{TS} = 22,341 \cdot \ln(X_m) + 115,75$	0,9132
	%E <sub>TF</sub>	$\%E_{TF} = 39,713 \cdot \ln(X_m) + 128,09$	0,9126

Referent al consum específic d'energia transferida a les fibres  $SEC_{TF}$  (figura 4.3.29), s'observa una disminució a mesura que augmenta la fracció massica. Per tant, a mesura que augmenta la fracció massica cal aplicar una menor quantitat d'energia per massa al púlper, per tal de desintegrar el paper.

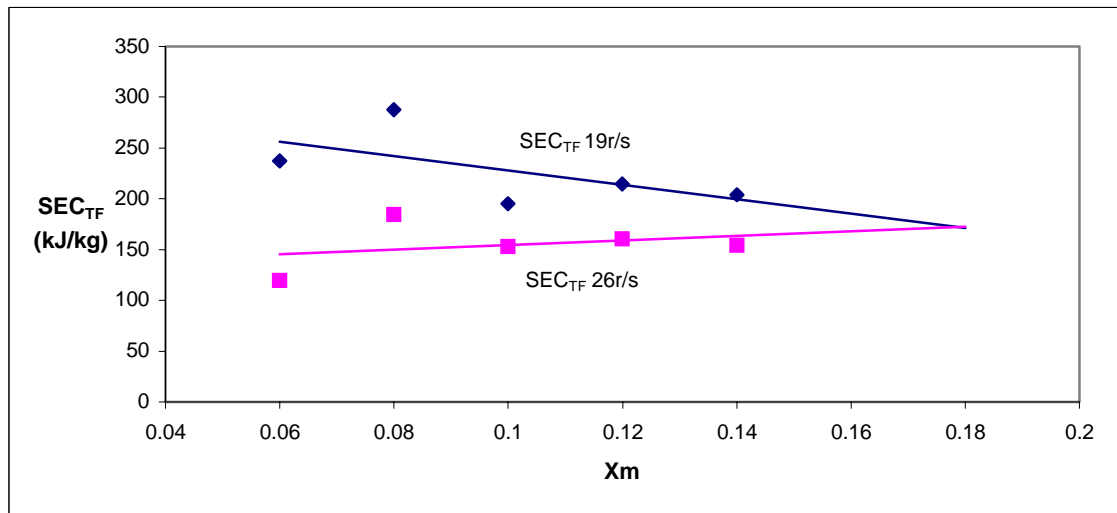
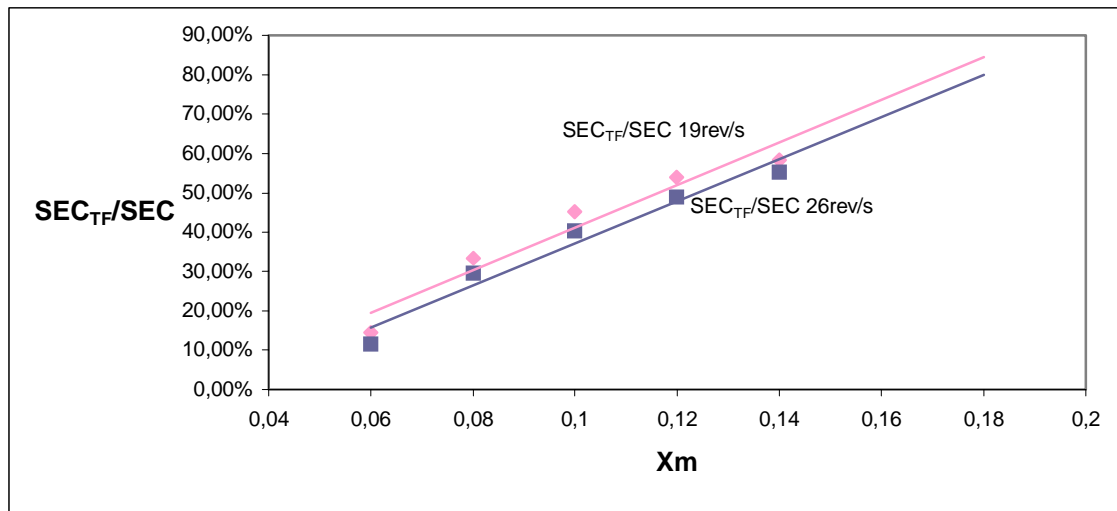


Figura 4.3.29:  $SEC_{TF}$  de PR a les dues velocitats d'agitació estudiades

Notis que la corba que representa el  $SEC_{TF}$  per una velocitat d'agitació de 19rev/s té més pendent que la de 26rev/s. Per tant, treballant a 19rev/s s'obtenen unes caigudes majors del  $SEC_{TF}$  al augmentar la consistència de la pasta. Això és un punt a tenir en compte a l'hora de la implementació industrial.

El quocient entre  $SEC_{TF}$  i  $SEC$  ens ajudarà a quantificar l'eficàcia de transferència d'energia de la suspensió cap a les fibres de cel·lulosa. La relació entre aquests dos paràmetres es la mostrada al gràfic de la figura 4.3.30.



**Figura 4.3.30:** Quocient entre  $SEC_{TF}$  i  $SEC$  de PR a les dues velocitats d'agitació estudiades.

A la vista de la gràfica de la figura 4.3.30, s'observa que a mesura que augmenta la fracció massica el quocient entre  $SEC_{TF}$  i  $SEC$  augmenta de manera lineal, indicant-se així un major aprofitament d'energia cap a les fibres. S'obtenen valors màxims de 58,45% per una agitació de 19 rev/s i de 55,24 a 26 rev/s.

La taula IV.3.29 recull les rectes de regressió que s'han ajustat als valors obtinguts experimentalment a l'hora de calcular el consum específic d'energia total  $SEC$  o transferit a les fibres  $SEC_{TF}$  a les dues velocitats d'agitació estudiades.

**Taula IV.3.29:** Equacions de les corbes d'ajust de  $SEC$  i  $SEC_{TF}/SEC$  en funció de  $X_m$  per PR

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	$SEC_{TF}$	$SEC_{TF} = -704,53 X_m + 298,18$	-
	$SEC_{TF}/SEC$	$SEC_{TF}/SEC = 5,4275 X_m - 0,1318$	0,9400
26 rev/s	$SEC_{TF}$	$SEC_{TF} = 225,99 X_m + 131,61$	-
	$SEC_{TF}/SEC$	$SEC_{TF}/SEC = 5,342 X_m - 0,1634$	0,9574

#### 4.3.2.2.4. Caracterització energètica. Estudi conjunt

En aquest exercici de síntesis, es realitza un estudi comparatiu dels tres papers estudiats per tal d'extreure els comportaments o punts en comú d'aquests, els quals ens poden servir de pauta a l'hora de preveure el comportament de qualsevol residu paperer a reciclar. De la mateixa manera, s'intentaran explicar els diferents comportaments dels tres papers estudiats, per així entendre millor el fenomen de la desintegració, des del punt de vista energètic

Com s'ha pogut observar durant la discussió dels apartats anteriors, el comportament dels tres papers segueix tendències similars, tant a 19 rev/s com a 26 rev/s. Les energies de desintegració de cada paper i a cada fracció màssica presenta el mateix comportament, però amb valors diferents que segueixen el següent ordre:

$$E_{TD}^{PR} > E_{TD}^{PQ} > E_{TD}^{PF}$$

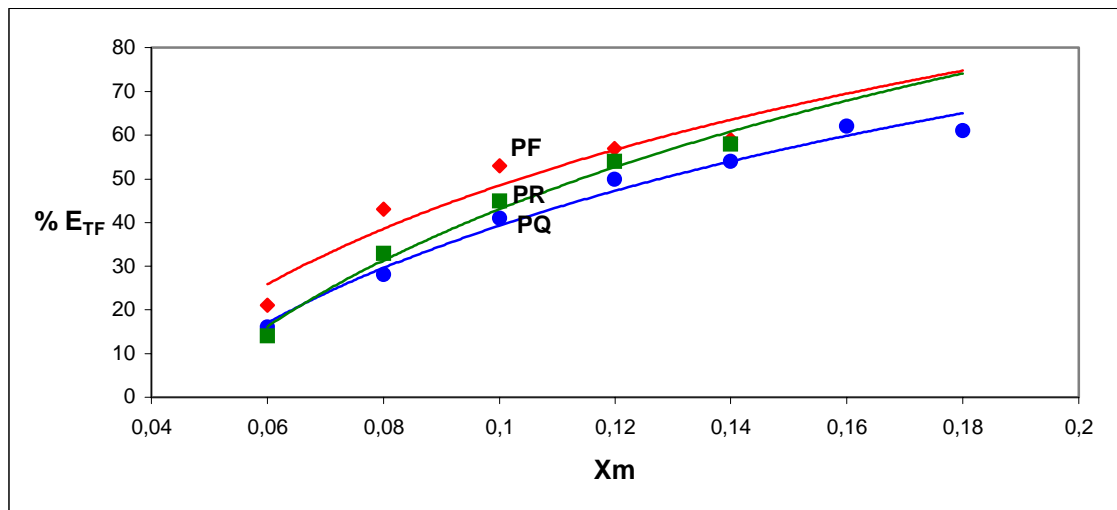
O sigui, el paper revista PR és el que necessita una major quantitat d'energia per desintegrar-se, seguit pel paper estucat de qualitat PQ i per últim, el paper fotocòpia PF és el que necessita una menor quantitat d'energia per a desintegrar-se. Les diferents demandes energètiques poden estar relacionades amb la diferent capacitat d'hidratació del paper. En concret els papers revista PR i estucat de qualitat PQ, són uns papers amb una capacitat d'hidratació baixa, per tant, és lògic que per un paper més resistent calgui més energia per desintegrar-lo.

Conèixer la relació entre la capacitat d'hidratació i l'energia necessària per desintegrar el residu paperer és una feina realment complicada i de difícil aplicació industrial, degut a que la matèria primera que utilitza la indústria paperera recicladora és d'un caràcter marcadament heterogeni. No obstant, les tendències que s'han marcat en aquest estudi són força interessants i cal tenir-les presents a l'hora de plantejar una operació de pulpejat.

Si s'estudia ara l'aprofitament real d'energia que experimenten aquests papers respecte l'energia total transferida al púlper %E<sub>TF</sub>, s'observa un comportament força interessant. Per fer aquest estudi s'han calculat els valors relatius o percentuals sobre l'energia total transferida a les fibres %E<sub>TF</sub>, per tal que les dades d'energia transmeses a les fibres fossin comparables pels tres papers. Com es pot observar en la figura

4.3.31 i la figura 4.3.32, el paper que experimenta un major aprofitament energètic és el paper fotocòpia PF, tot i ser aquest el que consumeix una menor energia total, la qual cosa li dóna un cert atractiu vers la recuperació d'aquest residu paperer.

Com ja s'ha comentat durant l'estudi energètic dels tres papers per separat, existeix una relació entre l'eficàcia energètica i el tipus de paper a recuperar. Això pot ser degut a que part d'aquesta energia transmesa és consumida pels diferents "contaminants" (film de polietilè, estucat, càrregues...) de cada paper i per la diferent facilitat per absorbir l'aigua. Per tant, els papers amb una major càrrega de contaminants i/o major dificultat d'absorbir aigua són els que presenten un menor rendiment energètic.



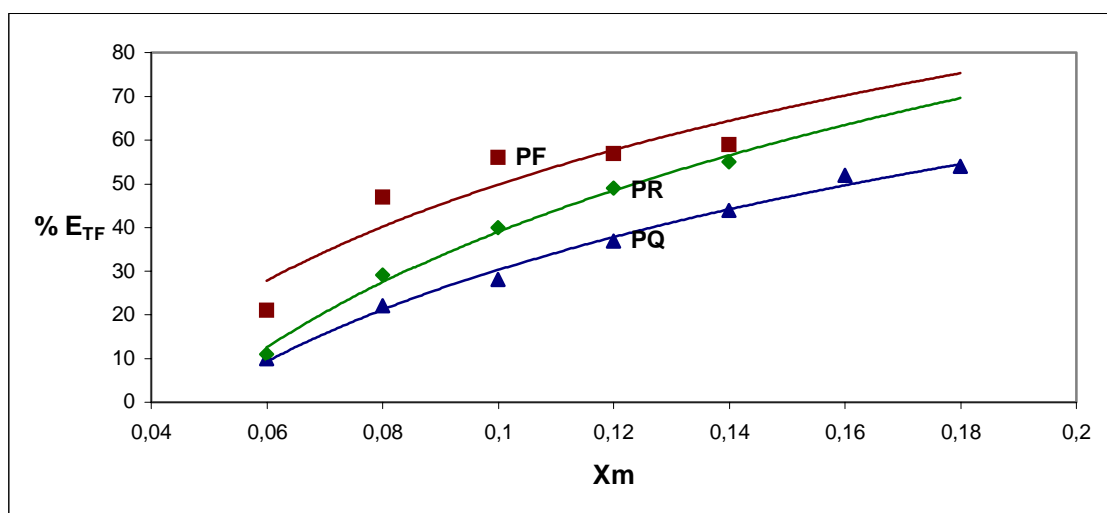
**Figura 4.3.31:** Percentatge d'energia transferida a les fibres (%E<sub>TF</sub>) per PQ, PR i PF a 19 rev/s.

L'eficàcia del procés es veu sensiblement millorada quan es treballa a una velocitat d'agitació major pel paper revista PR i el paper estucat de qualitat PQ. Com es pot veure en la figura 4.3.32, en comparació amb la gràfica 4.3.31, on l'energia transferida a les fibres és major per una velocitat d'agitació de 26 rev/s. És a dir, es transmet una major quantitat d'energia cap a les fibres quan s'agita la suspensió més energèticament.



Aproximadament els diferencials en  $\%E_{TF}$  es mantenen al llarg de l'interval de fraccions màssiques estudiades. Cal tenir en compte que quan parlem de  $\%E_{TF}$  ens referim als sòlids presents i com se sap, el paper té un contingut en càrregues del 19% pel paper PF, del 34% pel PR i del 43% pel PQ. S'observa que el valor de  $\%E_{TF}$  és més gran com més quantitat de fibra hi ha present a la suspensió. D'això se'n deriva que el consum energètic degut a la presència de sòlids diferents a les fibres és inferior que el consum causat per les fibres.

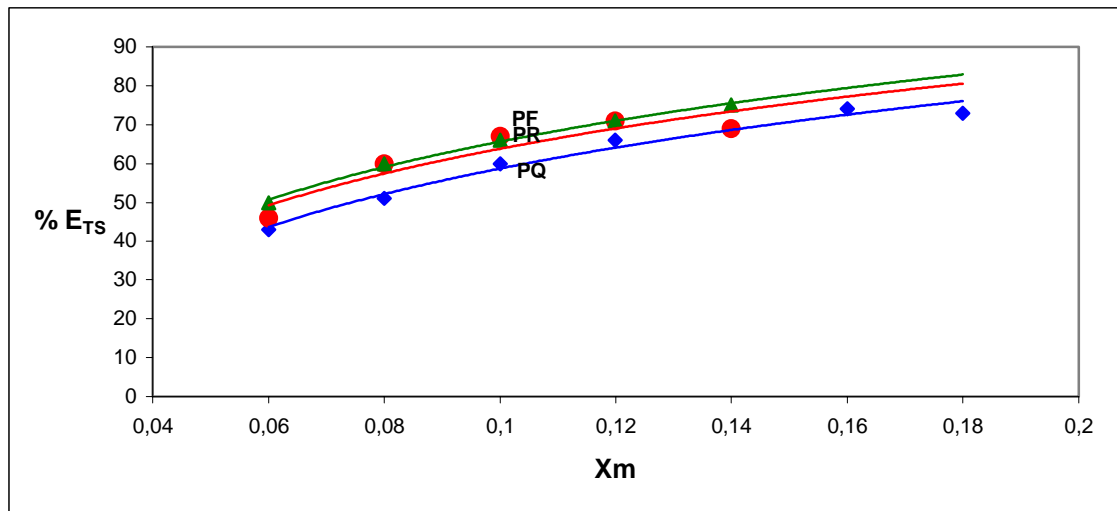
Es pot dir que en tots els casos augmenta el  $\%E_{TF}$  quan augmenta la fracció màssica, per tant en disminuir la quantitat d'aigua present en la suspensió, a més de l'estalvi d'aigua, millora l'aprofitament energètic.



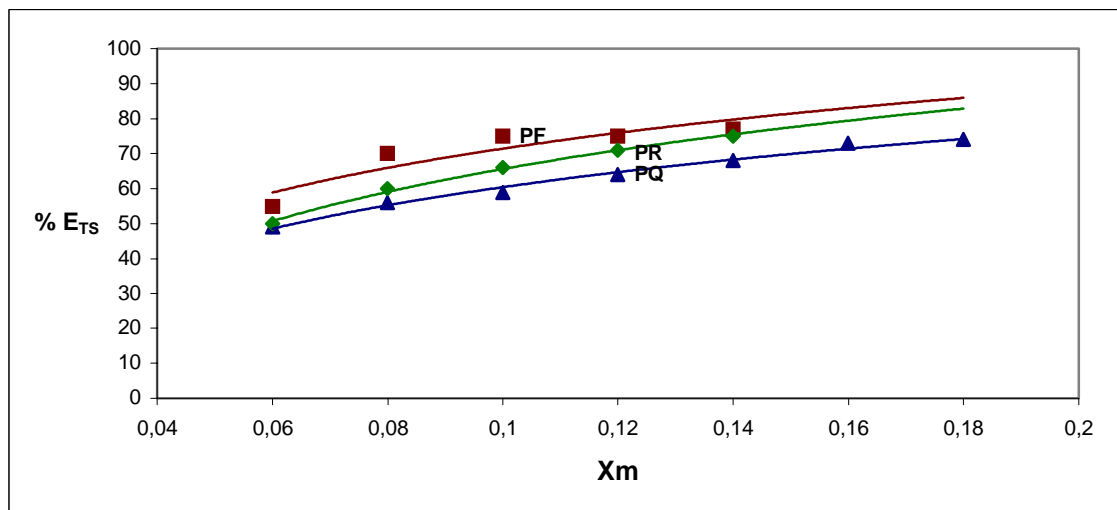
**Figura 4.3.32:** Percentatge d'energia transferida a les fibres ( $\%E_{TF}$ ) per PQ, PR i PF a 26rev/s.

Aquestes diferències entre el percentatge d'energia consumida per les fibres i sòlids en suspensió dels diferents tipus de paper, es veu fortament reduïda quan s'estudia la quantitat d'energia transferida a la suspensió, tal com mostra la figura 4.3.33, per una velocitat d'agitació de 19 rev/s i la figura 4.3.34 per una velocitat de 26 rev/s.

Indubtablement la suspensió fibrosa posseeix fibres i aigua, per tant aquest contingut d'aigua que comparteixen les tres suspensions, fa que es redueixin les diferències d'energia que es transmet a les fibres i a la suspensió fibrosa.



**Figura 4.3.33:** Percentatge d'energia transferida a la suspensió (%E<sub>Ts</sub>) per PQ, PR i PF a 19 rev/s.



**Figura 4.3.34:** Percentatge d'energia transferida a la suspensió (%E<sub>Tf</sub>) per PQ, PR i PF a 26 rev/s

Tal com passava en el cas de l'energia transferida a les fibres, el rendiment energètic és major a velocitats d'agitació majors pel PQ i el PR. És a dir, els percentatges d'energia transferida a la suspensió són majors per velocitats d'agitació més elevades.

Anant una mica més lluny en l'estudi de l'eficàcia energètica és pot estudiar el quocient entre l'energia transferida a les fibres i l'energia transferida a la suspensió (eq. 4.3.16) que ens donarà una idea de l'eficàcia de transmissió d'energia a les fibres, d'aquesta

manera podem conèixer quin és el percentatge d'energia que transferida a la suspensió es transfereix exclusivament a les fibres.

$$\eta_{sf} = \frac{E_{TF}}{E_{TS}} \cdot 100 \% \quad (\text{eq. 4.3.16})$$

La taula IV.3.30 mostra aquesta eficàcia de transmissió. Com es pot observar, segons aquest paràmetre  $\eta_{sf}$  independentment de la velocitat d'agitació, el paper que posseeix el major rendiment energètic és el paper fotocòpia, seguit del paper revista i paper estucat de qualitat amb uns rendiments força similars.

Taula IV.3.30: Percentatge d'energia transferida ( $\eta_{sf}$ ) per assolir un  $I_{sv}$  màxim del 0,01%

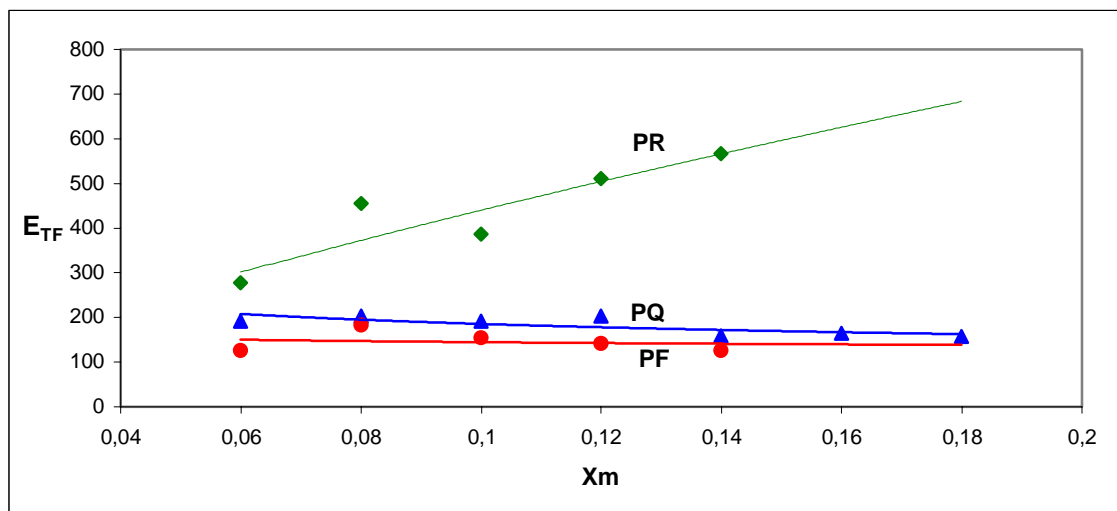
Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	% $\eta_{sf}$						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	37,21%	54,90%	68,33%	75,76%	78,26%	83,78%	83,56%
	26 rev/s	20,41%	39,29%	47,46%	57,81%	64,71%	71,23%	72,97%
	$\Delta \eta_{sf}$	16,80%	15,62%	20,88%	17,95%	13,55%	12,55%	10,59%
PF	19 rev/s	45,65%	71,67%	79,10%	80,28%	85,51%	-	-
	26 rev/s	38,18%	67,14%	74,67%	76,00%	76,62%	-	-
	$\Delta \eta_{sf}$	7,47%	4,52%	4,44%	4,28%	8,88%	-	-
PR	19 rev/s	33,33%	60,00%	71,43%	78,26%	80,56%	-	-
	26 rev/s	22,00%	48,33%	60,61%	69,01%	73,33%	-	-
	$\Delta \eta_{sf}$	11,33%	11,67%	10,82%	9,25%	7,22%	-	-

Referent a la influència de la velocitat d'agitació, els valors d'eficàcia de transmissió mostrats a la taula que segueix, mostren clarament que són més eficaços els procediments que agiten la suspensió fibrosa a una menor velocitat de rotació, sobretot per fraccions màssiques baixes.

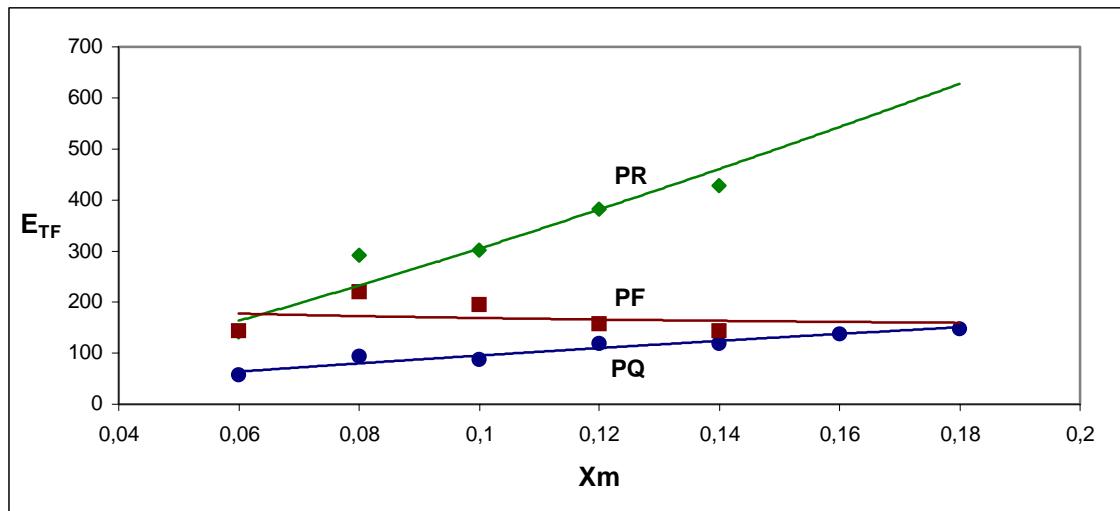
Un altre aspecte interessant a comentar és el fet que la diferència entre l'eficàcia de transmissió a les fibres per les dues velocitats estudiades, no es manté constant amb

la fracció màssica, sinó que disminueix pels tres papers estudiats. Aquest fet únicament pot ser atribuïble al fet que l'eficàcia de transmissió energètica cap a les fibres a 26 rev/s creix d'una manera més accentuada amb la fracció màssica del que ho fa a 19 rev/s. Per tant, per fraccions màssiques elevades pot resultar més convenient agitar la suspensió cel·lulòsica a una major velocitat, per tal d'afavorir així la transmissió d'energia a les fibres.

Un altre aspecte rellevant observat, és que l'energia transferida a les fibres en valor absolut, incrementa amb la fracció màssica, únicament pel paper revista PR i el paper estucat de qualitat PQ, mentre que es manté constant pel paper fotocòpia PF. Això pot ser atribuït a la quantitat de contaminants o càrregues que és més elevat pel paper PQ i PR, formant una capa d'estucat en la superfície, i més baix en el cas del paper PF. Les tendències anteriorment comentades es mostren a les figures 4.3.35 per velocitats d'agitació de 19 rev/s i 4.3.36 per velocitats d'agitació de 26 rev/s.



**Figura 4.3.35:** Energia transferida a les fibres ( $E_{TF}$ ) per PQ, PR i PF a 19 rev/s.



**Figura 4.3.36:** Energia transferida a les fibres ( $E_{TF}$ ) per PQ, PR i PF a 26 rev/s.

Es pot observar també que pels papers PR i PQ l'energia transferida a les fibres disminueix en augmentar la velocitat d'agitació, en canvi pel paper PF augmenta lleugerament. Com s'ha explicat, això és degut a que la velocitat òptima d'agitació és diferent per a cada un dels papers, i en especial pel paper PF respecte dels altres dos.

## 4.4. Viscositat aparent i energia de fluidització

Molts pocs autors s'han interessat en la mesura de la viscositat de les suspensions papereres, degut a que no es disposen d'aparells específics o per la dificultat que comporta. Quan es parla de viscositat de suspensions papereres el més propi és parlar de viscositat aparent donat que una suspensió paperera és un fluid no newtonià.

No obstant les dificultats, alguns autors, citats en aquest apartat, han efectuat mesures i estimacions teòriques per suspensions generalment només de fibres. L'interès d'aquest apartat, pel que fa a la viscositat aparent, es comparar els valors més adients de viscositat aparent amb els paràmetres obtinguts en aquest estudi, malgrat que les suspensions estudiades contenen percentatges apreciables de càrregues minerals.

D'altra banda, podríem dir el mateix pel que fa referència a la potència de fluidització en quan a autors que s'han interessat per aquesta temàtica. En aquest cas, a partir de les mesures experimentals de potència, s'han obtingut les equacions de potència de fluidització en funció de la consistència de les suspensions.

En el procés de desintegració, en els instants inicials, fins a 60 s en funció de la consistència es produeixen règims molt turbulents que esdevenen laminars un cop la suspensió ha arribat a la fluidització. Dels resultats obtinguts en quan a temps de desintegració s'entén que en aquesta fase, no hi ha desplaçament de la suspensió per flux del pistó.

### 4.4.1. Viscositat aparent

La viscositat des d'un punt de vista dinàmic es pot descriure com les forces d'unió que existeixen entre les molècules del fluid. Aquestes es poden dividir en forces de cohesió i forces d'adherència. Les forces de cohesió existeixen entre les molècules d'un fluid, al desplaçar-se unes molècules en relació amb les altres, en aquest cas es produeix una fricció o intercanvi de quantitat de moviment. Per altra banda, entre les molècules d'un fluid en contacte amb un sòlid i les molècules d'aquest sòlid existeixen forces

moleculars que es denominen forces d'adherència. El coeficient de fricció interna d'un fluid es denomina viscositat i es designa amb la lletra  $\mu$ .

La descripció de la viscositat es fa mitjançant la llei de Newton, que compleixen els fluids anomenats newtonians com s'ha vist en l'apartat de fonaments teòrics.

La suspensió al no ser un fluid homogeni, no permet mesurar la seva viscositat com passa amb els fluid newtonians. En el cas que fos possible mesurar la seva viscositat probablement trobaríem l'explicació del perquè quan les consistències són elevades, o van incrementant-se, l'eficàcia del pulpejat és superior i la suspensió presenta un percentatge de transferència d'energia a les fibres superior i com a conseqüència els temps de desfibrat són inferiors.

Molts pocs autors s'han interessat per les mesures de viscositat de les suspensions, sense dubte per la dificultat que comporta aquest tipus de mesures. Fa pocs anys Bennington i Kerekes (1996) van estimar, per un determinat tipus de pasta kraft semiblanquejada, que la viscositat aparent (s'anomena aparent donat que la suspensió no és un fluid newtonià) es pot expressar segons l'expressió Eq.4.4.1.

$$\mu_a = 1.5 \times 10^{-3} \cdot C^{3.1} \quad (\text{eq. 4.4.1})$$

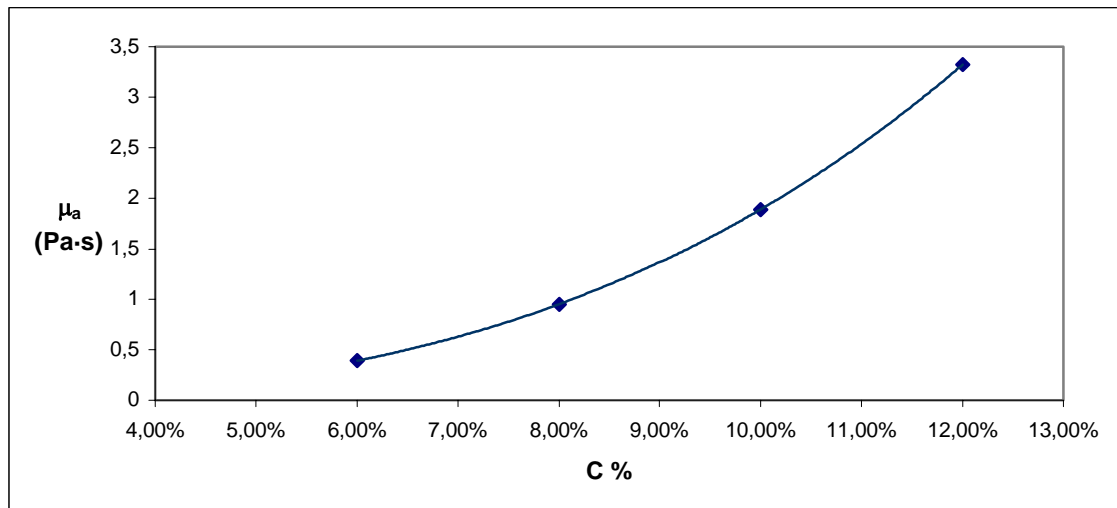
On :  $\mu_a$       Viscositat aparent (Pa·s)  
      **C**        Concentració o consistència en % dins el rang 1-12,3%

Segons l'expressió (eq. 4.4.1) les viscositats aparents que corresponen a la gamma de fraccions màssiques estudiades, són les reflectides a la taula IV.4.1.

**Taula IV.4.1:** Viscositats aparents en funció de la consistència segons Bennington i Kerekes (1996)

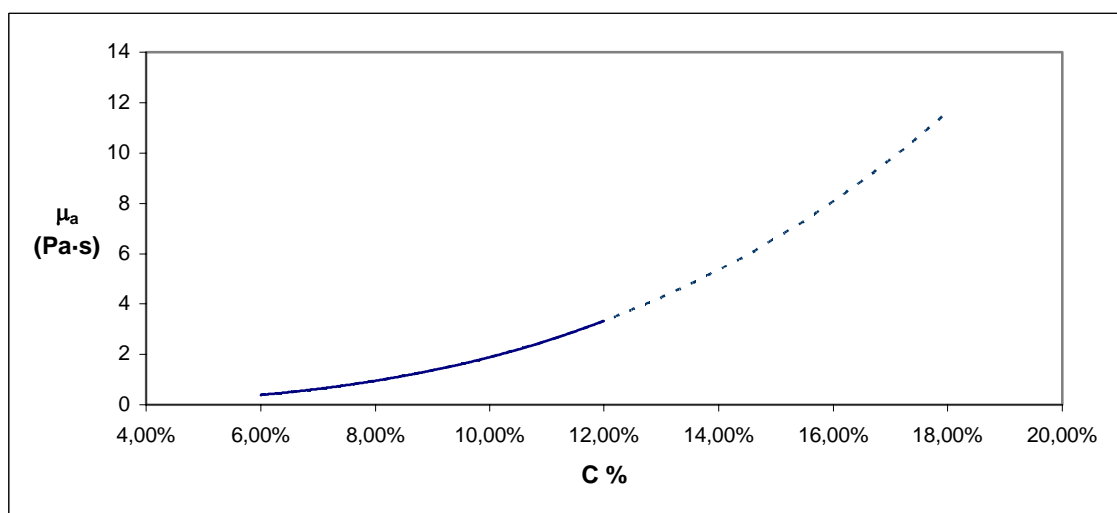
<b>C%</b>	<b>2,00%</b>	<b>4,00%</b>	<b>6,00%</b>	<b>8,00%</b>	<b>10,00%</b>	<b>12,00%</b>
<b><math>\mu_a</math> (Pa·s)</b>	0,013	0,11	0,39	0,95	1,89	3,32

A la taula IV.4.1 s'observa que la viscositat aparent de la suspensió augmenta amb l'increment de la fracció màssica, i la seva evolució es mostra a la figura 4.4.1.



**Figura 4.4.1:** Viscositat aparent en funció de la consistència segons Bennington i Kerekes (1996).

Es pot observar que la viscositat aparent és molt baixa per consistències o fraccions màssiques petites, però a mida que augmenten, la viscositat aparent també augmenta i de forma potencial. Aquest resultat és totalment lògic, ja que va agafant aparença de pasta a mesura que augmenta la fracció màssica d'aquesta. Pel mateix raonament anterior, les fibres són hidròfiles i s'originen importants interaccions amb el dissolvent ( $H_2O$ ) i entre elles. Si extrapolem el paràmetre de viscositat aparent fins al 18% de consistència, agafant-ho com a model teòric, es pot fer una valoració de l'evolució del desfibratge, amb les dades calculades a la taula IV.4.1. El resultat d'aquesta extrapolació és el que es mostra a la figura 4.4.2.



**Figura 4.4.2:** Viscositat aparent en funció de la consistència segons Bennington i Kerekes, extrapolada fins al 18% de consistència.



Malgrat que les estimacions de Bennington i Kerekes han estat fetes per un determinat tipus de fibres de cel·lulosa i sense presència de càrrega mineral, present en la majoria dels papers, es creu convenient fer un anàlisi comparatiu entre la viscositat aparent d'aquests investigadors i la inversa del temps de desintegració obtingut en aquesta tesi. Sobre la presència de càrregues minerals a la suspensió i com afecten aquestes càrregues a la viscositat de la suspensió quan hi ha presents en major o menor quantitat a la literatura opinions controvertides.

És a dir, alguns autors consideren que les càrregues augmenten la viscositat aparent mentre que d'altres la disminueixen. Cal no obstant, tenir en compte quina és la fracció de càrrega sobre el total de la suspensió. Com s'ha vist en l'apartat de materials i mètodes experimentals, la presència de càrrega en els papers estudiats s'incrementa linealment des del paper fotocopia fins al paper qualitat, passant pel paper revista. Per establir la comparació s'ha escollit en primer lloc, l'invers del temps de desintegració per poder establir, si és el cas, una correlació directament proporcional.

Teòricament si el temps de desintegració és elevat, l'invers serà baix i s'haurà de correlacionar amb una viscositat aparent petita o baixa. Això indicaria poca efectivitat de la viscositat aparent en el procés de desfibrat. El mateix es podria esmentar per temps de desintegració baixos i viscositats aparents elevades. Una altra qüestió seria la contribució de la viscositat aparent al desfibrat total.

A la taula IV.4.2 s'ha calculat l'invers del temps de desintegració per cadascun dels papers i a 19 i 26 rev/s i la viscositat aparent extrapolada. Les dades de la taula indiquen que a mesura que augmenta la viscositat aparent hi ha una disminució del temps de desintegració. Una possible interpretació és que quan la fracció màssica és elevada, la viscositat aparent també ho és, i la capacitat de fregament augmenta, augmentant així l'eficàcia del procés de desintegració.

Malgrat que les suspensions estudiades en aquesta tesi no són del tipus de Bennington i Kerekes, ja que contenen un percentatge de càrrega significatiu (42,5%, 34,6%, 19,6%), l'evolució de la viscositat aparent en funció del  $t_D$  experimental de les suspensions del PQ, PR i PF és similar.

Taula IV.4.2: Viscositat aparent (Pa·s) i temps de desintegració<sup>-1</sup> (min<sup>-1</sup>) per PQ, PR i PF a 19 i 26 rev/s.

		$\mu_a$	C %						
			6,00%	8,00%	10,00%	12,00%	14,00%	16,00%	18,00%
Paper	$W_{\text{ROTOR}}$		0,39	0,95	1,89	3,32	5,36 <sup>(1)</sup>	8,1 <sup>(1)</sup>	11,7 <sup>(1)</sup>
1/t <sub>D</sub>	PF	19 rev/s	0,071	0,143	0,250	0,333	0,400	-	-
		26 rev/s	0,091	0,200	0,333	0,417	0,500	-	-
	PQ	19 rev/s	0,030	0,065	0,125	0,159	0,222	0,303	0,385
		26 rev/s	0,100	0,154	0,222	0,250	0,313	0,370	0,435
	PR	19 rev/s	0,020	0,037	0,071	0,077	0,083	-	-
		26 rev/s	0,045	0,071	0,111	0,125	0,143	-	-

En les gràfiques de les figures 4.4.3 i 4.4.4 es mostra una comparació entre l'evolució de la  $\mu_a$  de Bennington i Kerekes i la que hem obtingut experimentalment en el nostre estudi. Com s'observa, l'evolució de l'invers del temps de desintegració i  $\mu_a$  és similar.

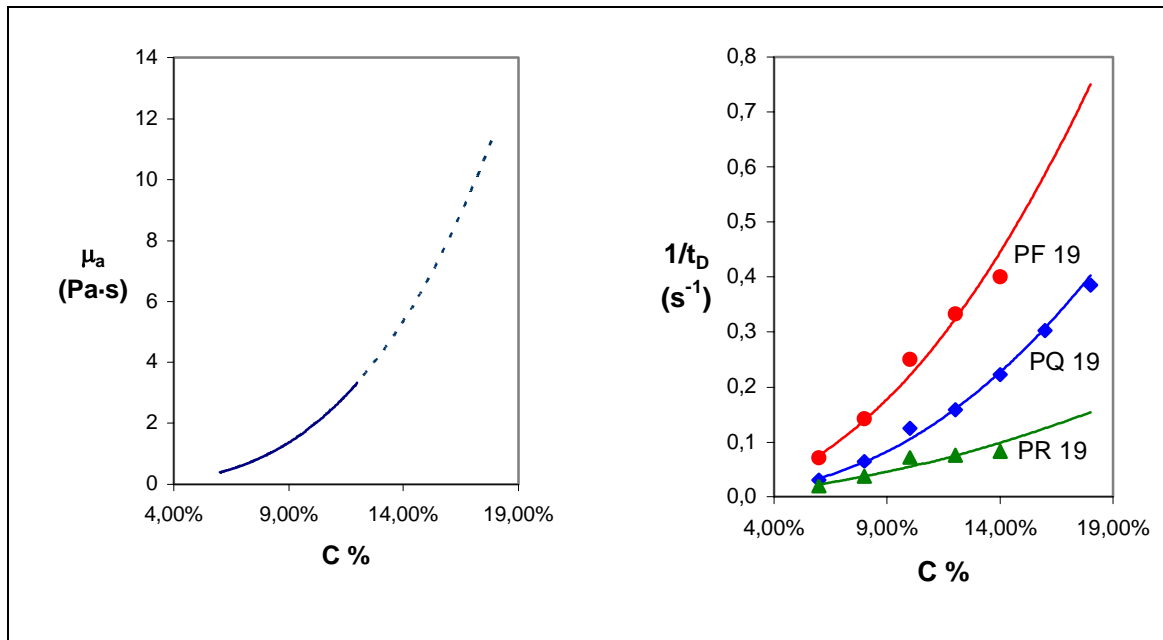
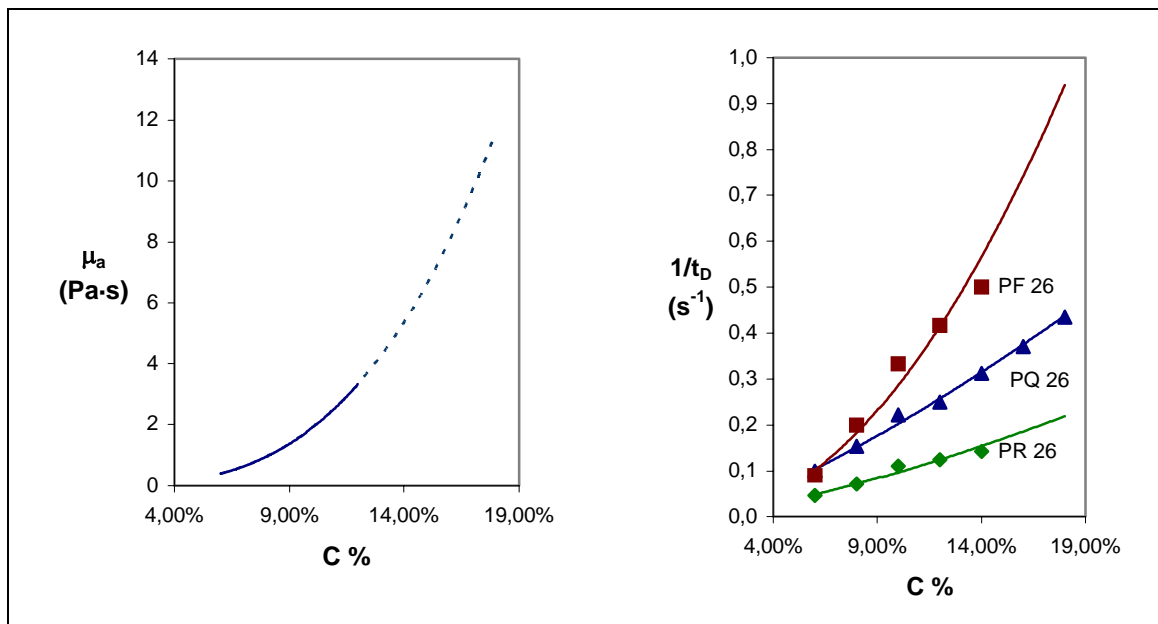


Figura 4.4.3: Comparació de la viscositat aparent en funció de la consistència segons Bennington i Kerekes i el valor de 1/t<sub>D</sub> per PQ, PR i PF a 19 rev/s.

<sup>(1)</sup> Valors fora del marge de validesa de l'expressió de Bennington i Kerekes.



**Figura 4.4.4:** Comparació de la viscositat aparent en funció de la consistència segons Bennington i Kerekes i el valor de  $1/t_D$  per PQ, PR i PF a 26 rev/s

Per altra banda, en les figures 4.4.5 i 4.4.6, es pot observar com hi ha una relació de tipus logarítmic entre la viscositat aparent i l'invers del temps de desintegració. Cal tenir en compte que aquesta figura només es pot considerar de manera qualitativa ja que en ella es pren la viscositat aparent igual per a tots els tipus de paper, cosa que no es correspon amb la realitat de manera quantitativa. Es pot concloure que en augmentar la viscositat aparent de la suspensió, augmenta també l'eficàcia de desfibrat.

A més, a la vista de la figura, es pot comentar que a mesura que s'augmenta la velocitat del rotor, en aquest cas de 19 a 26 rev/s, aquest fenomen es fa més efectiu. Tot i que, a l'equació de Bennington de  $\mu_a$  en funció de la consistència (eq. 4.4.1) no s'hi preveu la influència de la velocitat del rotor.

Es fa palès que la velocitat de la suspensió a l'interior del púlper augmenta amb la qual cosa probablement disminueix el temps de contacte entre els sòlids però augmenta la freqüència. Com a producte d'aquesta situació de les interaccions que es tradueix en un major eficàcia del desfibrat.

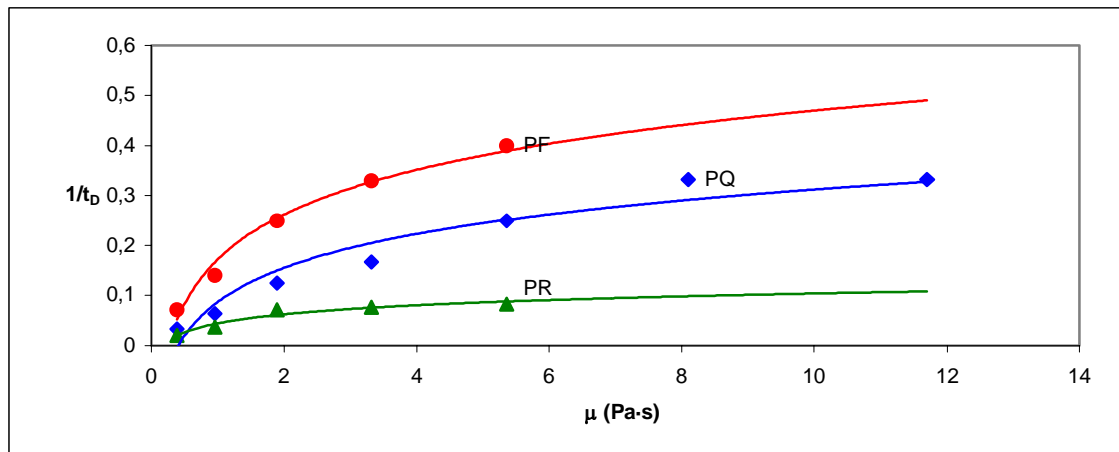


Figura 4.4.5: Representació de  $1/t_D$  en relació amb la viscositat aparent  $\mu_a$  a 19 rev/s.

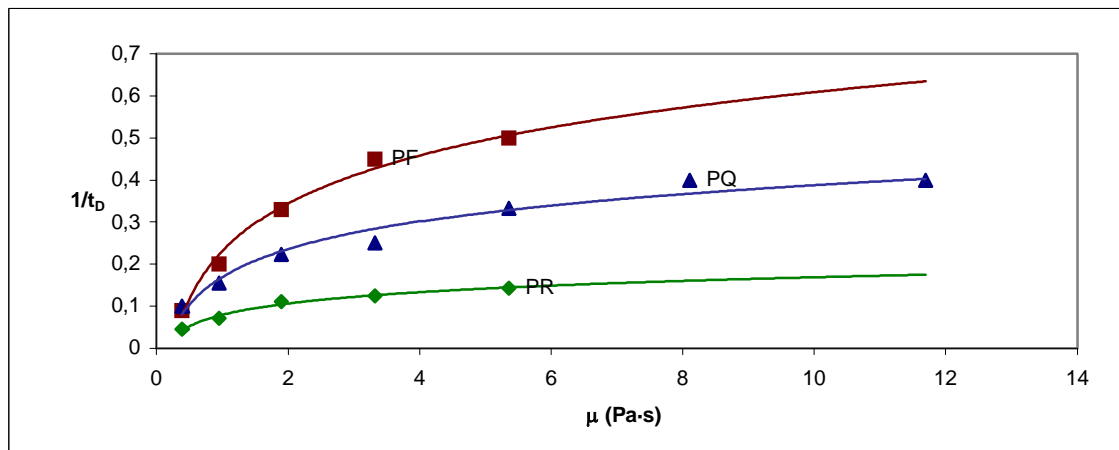


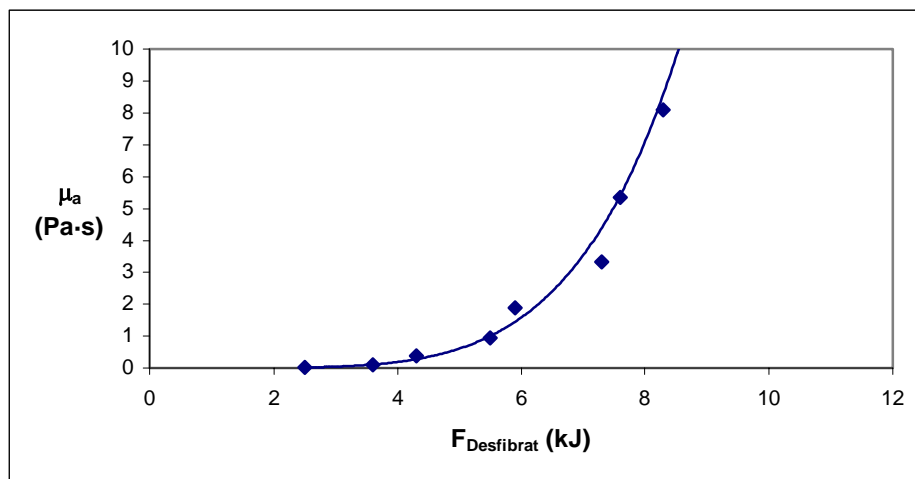
Figura 4.4.6: Representació de  $1/t_D$  en relació amb la viscositat aparent  $\mu_a$  a 26 rev/s.

La taula IV.4.3 que es mostra a continuació, recull les diferents equacions d'ajust per les diferents corbes de les gràfiques 4.4.5 i 4.4.6.

Taula IV.4.3: Equacions de les corbes d'ajust per les diferents tendències trobades.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$1/t_D = 0,0976 \cdot \ln(\mu_a) + 0,0878$	0,9387
	PR	$1/t_D = 0,0259 \cdot \ln(\mu_a) + 0,0445$	0,9456
	PF	$1/t_D = 0,1289 \cdot \ln(\mu_a) + 0,1732$	0,9832
26 rev/s	PQ	$1/t_D = 0,0952 \cdot \ln(\mu_a) + 0,1694$	0,9670
	PR	$1/t_D = 0,0385 \cdot \ln(\mu_a) + 0,0796$	0,9857
	PF	$1/t_D = 0,1641 \cdot \ln(\mu_a) + 0,2312$	0,9892

Aquestes evolucions de l'invers del temps de desintegració amb la viscositat aparent fan pensar que hi deu haver també una bona correlació entre la viscositat aparent de Bennington i Kerekes i la intensitat relativa de les forces totals de desfibratge obtingudes en aquesta tesi. La gràfica de la figura 4.4.7 mostra aquesta correlació que resulta ser  $r^2 = 0.9902$ .



**Figura 4.4.7:** Correlació entre la viscositat aparent de Bennington i Kerekes i la força de desfibratge de Paraskevas.

Si s'estudia la relació entre el consum específic d'energia (SEC) i la viscositat aparent  $\mu_a$ , es pot constatar que existeix una relació de tipus potencial i decreixent amb l'augment de la viscositat aparent. Per tant, a mesura que augmenta la viscositat de la suspensió, cal aplicar una menor quantitat d'energia.

L'explicació d'aquest fet és que a mesura que augmenta la viscositat del fluid augmenten les forces de fricció entre fibres de cel·lulosa, augmentant-se d'aquesta manera la capacitat de desintegració del paper.

Les figures 4.4.8 i 4.4.9 mostren aquesta correlació entre el consum específic d'energia i la viscositat del paper pels tres papers estudiats i les dues velocitats d'agitació emprades.

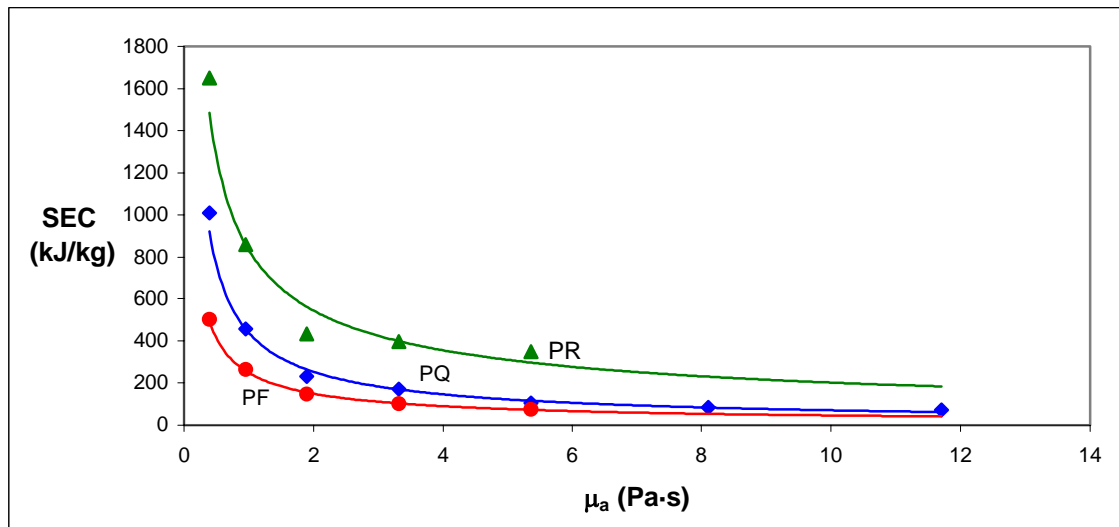


Figura 4.4.8: Representació de SEC (kJ/kg) en relació amb la viscositat aparent  $\mu_a$  a 19 rev/s.

Al representar el mateix gràfic però per la segona velocitat d'agitació estudiada (26 rev/s), es pot observar que les tendències que marcaven la gràfica de la figura 4.4.8 són pràcticament les mateixes que les mostrades a la gràfica de la figura 4.4.9. Únicament comentar, que a velocitats d'agitació majors i pel paper estucat de qualitat PQ i el paper revista PR, cal un consum específic d'energia major per a una mateixa viscositat aparent que el que caldria treballant a una menor velocitat d'agitació.

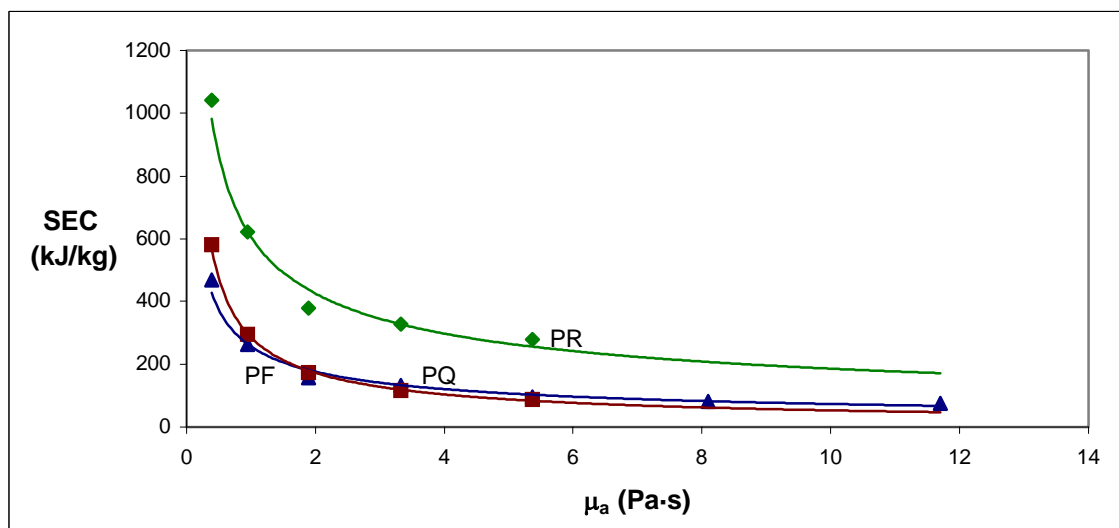


Figura 4.4.9: Representació de SEC (kJ/kg) en relació amb la viscositat aparent  $\mu_a$  a 26 rev/s.

Les equacions de les diferents corbes d'ajust obtingudes són les que es mostren a la taula IV.4.4.

Taula IV.4.4: Equacions d'ajust per les diferents tendències trobades en les gràfiques SEC- $\mu_a$

$\omega_{\text{ROTOR}}$	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$SEC = 437,95 \cdot \mu_a^{-0,7915}$	0,9901
	PR	$SEC = 832,51 \cdot \mu_a^{-0,6144}$	0,9378
	PF	$SEC = 248,12 \cdot \mu_a^{-0,7312}$	0,9971
26 rev/s	PQ	$SEC = 255,76 \cdot \mu_a^{-0,5429}$	0,9817
	PR	$SEC = 606,08 \cdot \mu_a^{-0,5140}$	0,9727
	PF	$SEC = 285,56 \cdot \mu_a^{-0,7318}$	0,7318

#### 4.4.2. Potència de fluidització

La potència de fluidització s'expressa com la potència requerida per unitat de volum de la suspensió per fer esdevenir la suspensió un fluid homogeni continu ( $\xi_f$ ). En aquest cas el volum de la suspensió ha estat constant i de 20L igual a  $0,02 \text{ m}^3$ .

D'acord amb les dades de l'apartat 4.3 de potència consumida en funció de la fracció massica i referint-les a la unitat de volum ( $\text{kW/m}^3$ ) les potències necessàries per la fluidització de la suspensió es reflexen a la taula IV.4.5.

Taula IV.4.5: Potència de fluidització  $\xi_f$  ( $\text{kW/m}^3$ )

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	C %						
		6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00
PQ	19 rev/s	34,50	39,30	48,33	53,84	54,63	67,17	83,01
	26 rev/s	47,50	53,97	57,96	66,67	70,31	81,17	99,28
PF	19 rev/s	36,00	50,12	60,83	68,06	70,67	-	-
	26 rev/s	53,50	78,67	96,11	96,18	102,08	-	-
PR	19 rev/s	38,00	42,44	51,43	61,15	67,78	-	-
	26 rev/s	50,00	59,35	75,50	81,77	92,98	-	-

Els valors numèrics de la taula IV.4.5 són representats a les gràfiques de les figures 4.4.10 i 4.4.11. A la vista d'aquests gràfics es pot observar que són corbes de tipus potencial i que s'ajusten a l'expressió que segueix:

$$\xi_f = a \cdot C^b \quad (\text{eq. 4.4.2})$$

El valor de **a** i **b** és una constant que depèn del tipus de paper i de les condicions hidrodinàmiques en les que treballa en púlper, en el nostre cas, les dues velocitats d'agitació emprades: 19 i 26 rev/s. El valor d'aquestes dues constants es recollit per la taula IV.4.6. La consistència **C** està expressada en grams de sòlid per 100 grams de suspensió.

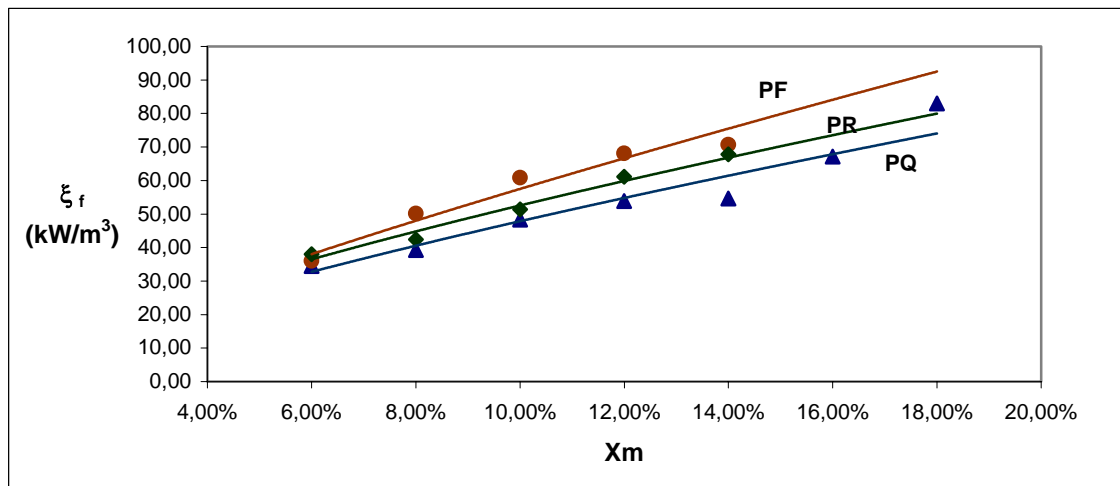


Figura 4.4.10: Potència de fluidització per PQ, PR i PF a 19 rev/s.

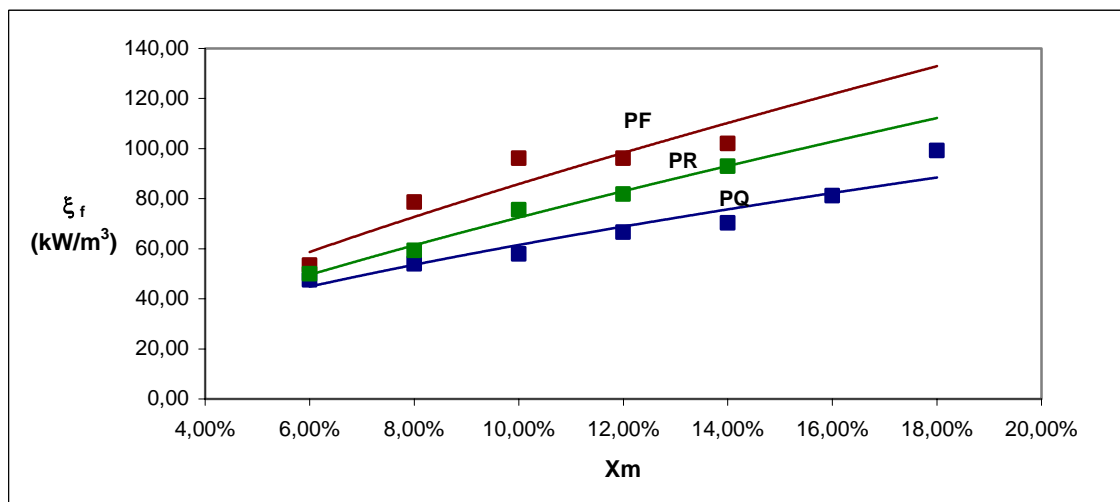


Figura 4.4.11: Potència de fluidització per PQ, PR i PF a 26 rev/s.



**Taula IV.4.6:** Valors dels coeficient a i b que quantifiquen la potència de fluidització pels diferents papers i velocitats d'agitació emprades

$\varnothing$ ROTOR	Tipus	a	b	$r^2$
19 rev/s	PQ	264,64	0,7427	0,9424
	PF	370,51	0,8092	0,9580
	PR	272,21	0,7143	0,9755
26 rev/s	PQ	255,23	0,6179	0,9290
	PF	475,84	0,7438	0,8794
	PR	401,69	0,7437	0,9876

Les equacions obtingudes són producte de l'ajust efectuat sobre les potències per unitat de volum per cadascun dels paperots i velocitat del rotor. En general es pot dir que responen amb força exactitud a l'evolució de la potència per unitat de volum amb la consistència.

Però com es pot observar al comparar-les amb les equacions de Wahren (1980) i Gullischen i Härkönen (1981), Bennington i Kerekes (1996) i de Wahren modificada per Bennington i Kerekes (1996), l'ordre de magnitud de les potències de fluidització obtingudes són sensiblement inferiors i les equacions trobades reflexen aquesta situació.

Així per exemple, d'acord amb l'equació de Bennington i Kerekes (1996), la potència de fluidització d'una suspensió de pasta kraft al 14%, seria aproximadament de 2559 kW/m<sup>3</sup>, mentre que en el cas del paper fotocopia PF, que és el que té un contingut en càrrega més baix, seria de 102,08 kW/m<sup>3</sup>. En aquest últim cas, no hi ha dubte de la homogeneïtat de la suspensió en el procés de fluidització donat que s'han eliminat la fase inicial d'extrema turbulència. Tampoc la suspensió es mou amb un flux tipus pistó. Cal esmentar que el dispositiu utilitzat per aquests autors és sensiblement diferent al púlper equipat amb un rotor helicoïdal.

Finalment, cal esmentar que la potència de fluidització per cada tipus de paperot és sensible al contingut en càrrega. Per tant, les potències de fluidització es reparteixen de la següent manera:

$$\xi_f^{PF} > \xi_f^{PR} > \xi_f^{PQ}$$

L'augment de la velocitat del rotor implica un augment de la potència de fluidització, segurament escurçant el temps necessari per arribar a la fluidització.

## 4.5. Reologia del púlper

En els apartats anteriors s'ha estudiat successivament l'evolució del temps de desintegració  $t_D$  per assolir un objectiu de desintegració del 0,01% en l'índex de Sommerville en funció de la fracció màssica de treball i l'evolució de l'energia dissipada a la suspensió, en les seves diferents fraccions en funció de la fracció màssica de treball i finalment l'evolució del temps de desintegració, per les diferents fraccions màssiques, comparativament a la viscositat aparent d'una suspensió de fibres verges, també a diferents consistències.

Es constata que el temps de desintegració es un paràmetre clau, quan es refereix a un objectiu de desintegració, per avaluar la desintegració o desfibratge en el púlper per les diferents consistències estudiades.

El temps de desintegració o la seva evolució amb la fracció màssica representa indirectament o millor dit inversament, l'evolució de les forces immerses en la desintegració, sobretot a mitjanes consistències (8~18%) i la seva evolució amb la fracció màssica presenta una excel·lent correlació amb la intensitat relativa de les forces hidràuliques de Paraskevas o de viscositat i acceleració de Holik, segons Pèlach. No obstant, no es pot assolir una quantificació absoluta d'aquestes forces o relativa per diferents materials desintegrats.

Segurament que l'evolució d'aquestes forces fa que el temps de desintegració i el consum específic d'energia (SEC) disminueixi sensiblement en augmentar la fracció màssica, a la vegada que requereix més potència instal·lada a la màquina. Com a resultat augmenta la producció i hi ha major disponibilitat de la màquina per un objectiu determinat de producció. També queda clar, amb les referències bibliogràfiques aportades que la viscositat aparent (estimada) de la suspensió augmenta de forma exponencial al augmentar la fracció màssica segons Bennington i Kerekes (1966). Aquesta viscositat aparent, sense dubte deu estar vinculada a les forces immerses en el procés de desintegració, presentant una bona correlació amb el temps de desintegració necessari pels diferents materials, diferents fraccions màssiques i per un objectiu de desintegració ( $I_{SV} \sim 0\%$ ).

La viscositat aparent estimada, permet doncs quantificar les forces implicades en el pulpejat, per una determinada composició de la suspensió, però presenta l'inconvenient de la dificultat de la seva mesura (es requereix un aparell específic) o els possibles errors que es puguin derivar dels càlculs teòrics en la seva estimació. En tots els casos, que se sàpiga la fracció màssica límit es situa en el 12,6% , també segons Bennington i Kerekes (1996).

Amb la caracterització reològica del púlper (Fabry, 1999) i la generalització del concepte de viscositat aparent (Metzner i Otto, 1957) es pretén quantificar de forma absoluta i global, el procés de desintegració per una determinada composició de la suspensió i geometria del púlper.

Cal cercar doncs una metodologia per la caracterització reològica del púlper i de la suspensió. Les suspensions papereres són heterogènies i compressibles i es poden deformar per cisallament. Aquest comportament dificulta la seva caracterització en termes de viscositat o de viscositat aparent, i per analogia, Fabry (1999) defineix el factor de cisallament  $\lambda$  (Pa·s).

#### **4.5.1. Modelització del púlper**

El concepte de viscositat aparent definit per Metzner i Otto (1957), es basa en la utilització del sistema d'agitació com un reòmetre de procés. Es defineix la viscositat aparent mitjana o efectiva com la viscositat d'un fluid newtonià que, en unes mateixes condicions geomètriques i operatòries (com el diàmetre i velocitat d'agitació) requereixi la mateixa potència neta d'agitació. El fluid newtonià utilitzat per aquest estudi va ser la glicerina, del que se'n va determinar la viscositat, el pes específic i la potència d'agitació.

La dificultat de conèixer el comportament del flux de fibres (laminar, turbulent o de transició) feia aconsellable substituir el terme viscositat aparent per un nou paràmetre: el factor de cisallament  $\lambda$  de la suspensió fibrosa, amb un mateix consum de potència per unes mateixes condicions d'agitació. D'acord amb Roustan et al. (1980), la

potència necessària per mobilitzar un agitador en el sí d'un fluid newtonià pot expressar-se en funció de les propietats del fluid i els factors geomètrics de l'agitador o desintegrador, segons l'expressió general:

$$N_p = k_1 \cdot \text{Re}^X \cdot \text{Fr}^Y \quad (\text{eq. 4.5.1})$$

A on:

<b><math>N_p</math></b>	Nombre de Potència o de Newton
<b><math>\text{Re}</math></b>	Nombre de Reynolds
<b><math>\text{Fr}</math></b>	Nombre de Froude
<b><math>k_1, X, i Y</math></b>	Constants depenent de factors geomètrics del sistema, del fluid i de l'interval de velocitats del rotor

Les següents expressions defineixen, respectivament els nombres citats anteriorment.

$$N_p = \frac{P_n}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} \quad (\text{eq. 4.5.2})$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu} \quad (\text{eq. 4.5.3})$$

$$\text{Fr} = \frac{d \cdot n^2}{g} \quad (\text{eq. 4.5.4})$$

A on:

<b><math>P_n</math></b>	Potència neta mitjana [W]
<b><math>\rho</math></b>	Pes específic del fluid [ $\text{kg/m}^3$ ]
<b><math>n</math></b>	Velocitat de l'agitador [rev/s]
<b><math>d</math></b>	Diàmetre equivalent del rotor [m]
<b><math>\mu</math></b>	Viscositat dinàmica del fluid [Pa·s]
<b><math>g</math></b>	Acceleració de la gravetat [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]

Per obtenir  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  s'han preparat dissolucions aigua-glicerina al 100, 95, 90, 85, 80, 60, 40, 20 i 0% en percentatge en pes (Mutjé et al., 2001 i Mutjé et al., 2003)

Per cadascuna d'aquestes dissolucions s'ha determinat el pes específic ( $\text{kg/m}^3$ ) i la viscositat dinàmica ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) a  $25^\circ\text{C}$ . A la taula IV.5.1 es mostra la viscositat i el pes específic de les dissolucions en funció del percentatge de glicerina.

Taula IV.5.1: Pes específic i viscositat dinàmica de les dissolucions.

% p/p	0	20	40	60	80	85	90	95	100
$\mu \times 10^4$	8,9	15	31,8	82	340	1012	2263	4764	9340
$\rho$	997	1045	1097	1151	1205	1218	1232	1245	1258

Si es representen gràficament l'evolució de la viscositat (figura 4.5.1) i del pes específic (figura 4.5.2) amb el percentatge de glicerina. Es pot observar que respecte a la viscositat, existeix un fort increment d'aquest paràmetre per concentracions elevades de glicerina, a partir del 60% la viscositat passa de  $82 \cdot 10^{-4}$  a  $9340 \cdot 10^{-4}$   $\text{Pa}\cdot\text{s}$  per una concentració de glicerina del 100%. És a dir, experimenta un augment superior a les 1000 vegades. Referent al pes específic, únicament comentar que la seva tendència és lineal i creixent amb el temps.

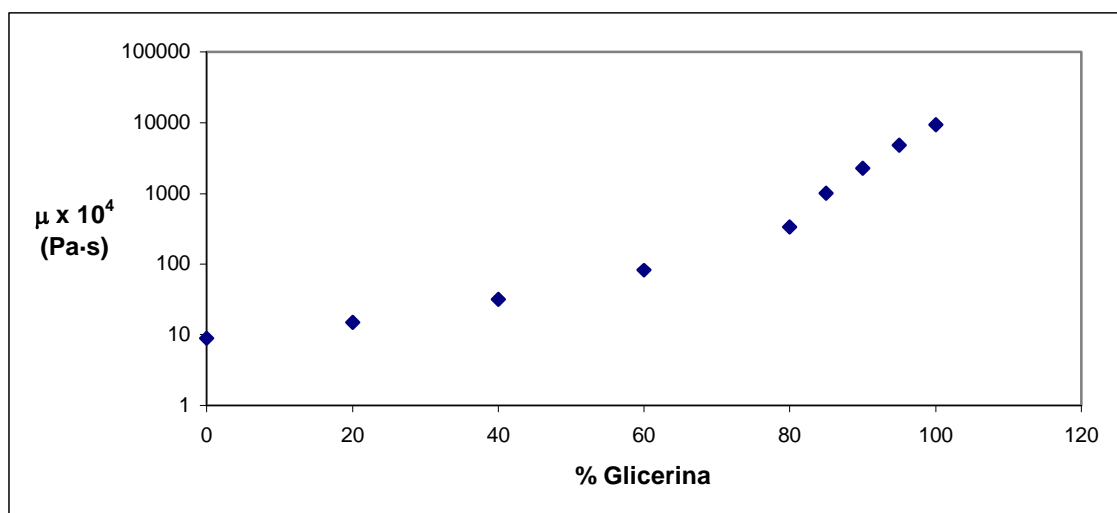


Figura 4.5.1: Evolució de la viscositat ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) en funció de la concentració de glicerina.

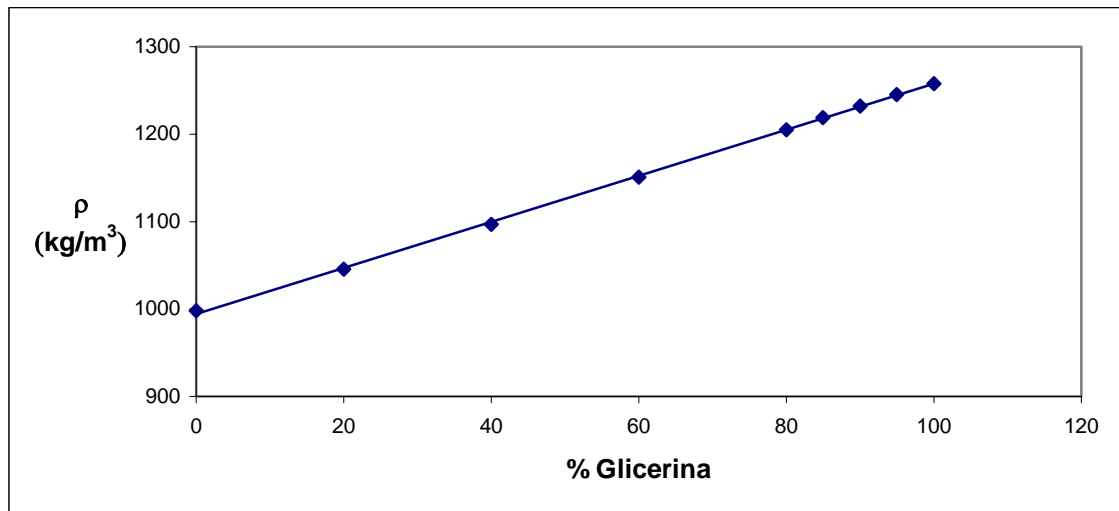


Figura 4.5.2: Evolució del pes específic ( $\text{Kg/m}^3$ ) en funció de la concentració de glicerina.

Si ens fixem ara en l'evolució de la potència neta  $P_n$  en funció de la concentració de glicerina i la velocitat d'agitació del púlper: 19 i 26 rev/s, podem veure que la tendència que segueixen és del tipus potencial, tal com mostra la figura 4.5.3. També es pot observar que la potència neta és major quan es treballa a una menor velocitat d'agitació.

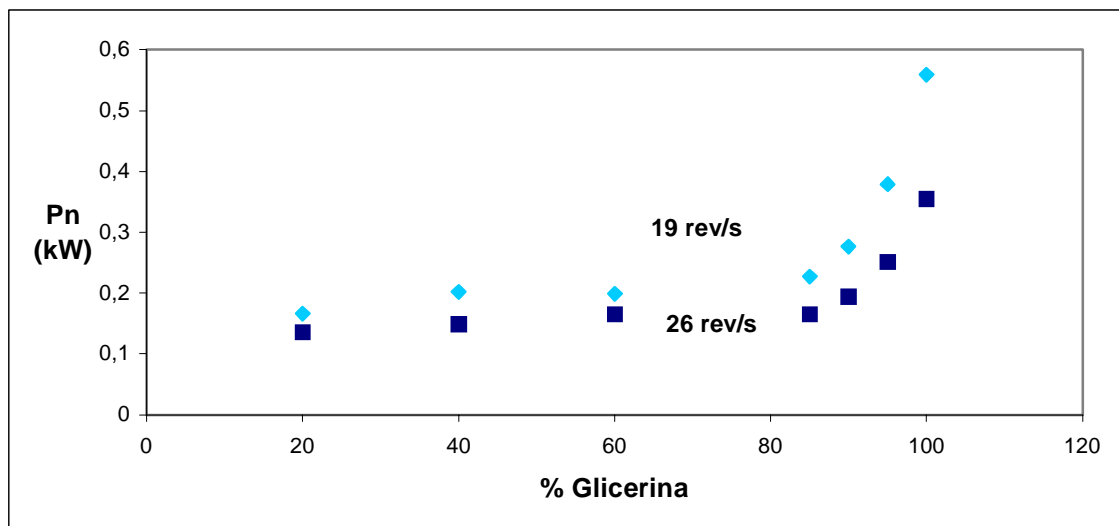
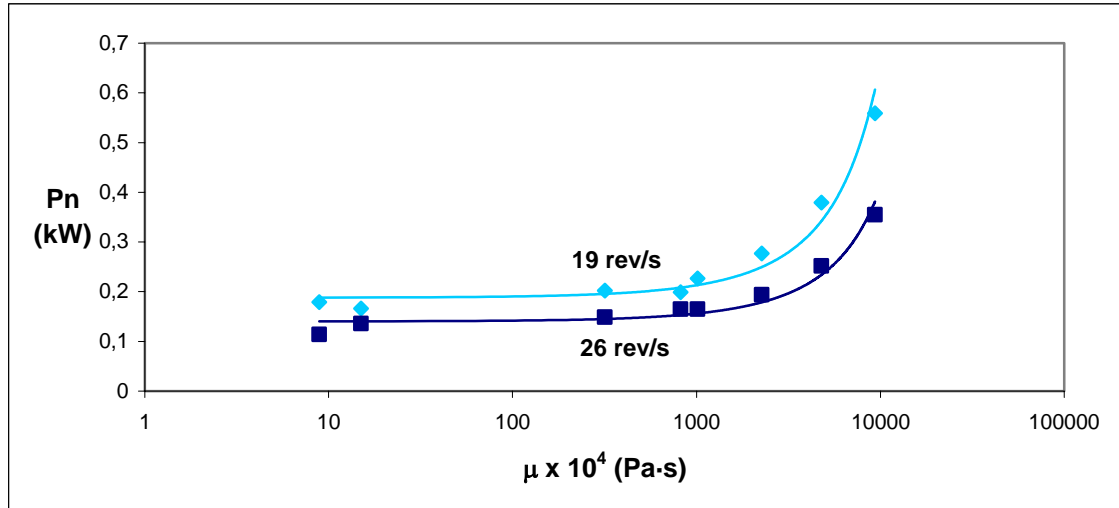


Figura 4.5.3: Evolució de número de la potència neta  $P_n$  (kW) en funció de la velocitat d'agitació (rev/s) i el percentatge en pes de glicerina en la dissolució per un rotor helicoidal.

Per últim, si s'estudia l'evolució de la potència neta amb la viscositat i la velocitat d'agitació del púlper, s'observa que la tendència que les correlaciona és de tipus potencial (figura 4.5.4).



**Figura 4.5.4:** Evolució de la potència neta Pn (kW) en funció de la velocitat d'agitació (rev/s) i la viscositat de la dissolució per un rotor helicoidal

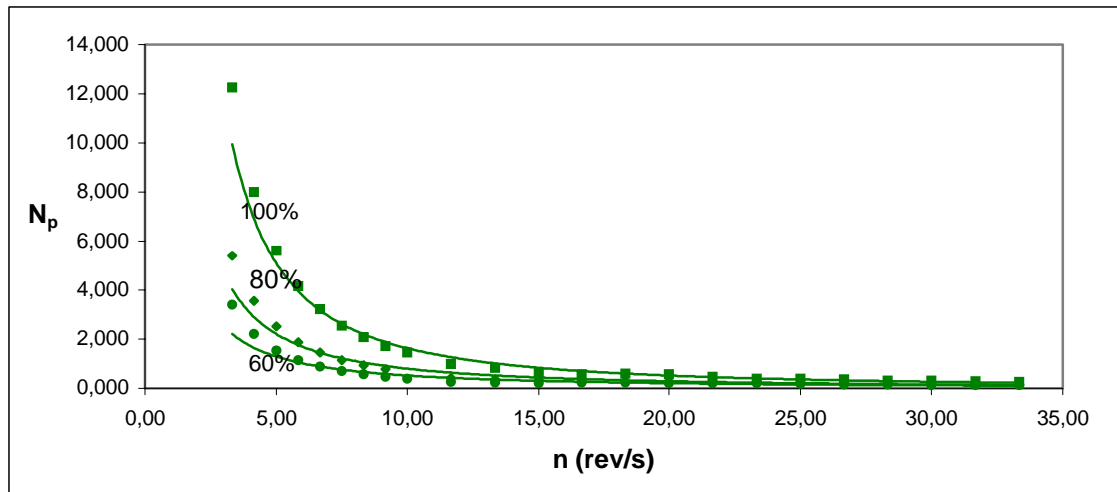
A partir dels valors de la taula IV.5.1 s'han calculat el valor del número de potència  $N_p$ , el número de Reynolds  $Re$  i el número de Froude  $Fr$ . Els valors d'aquests paràmetres es troben a l'annex 4.5.1 per l'estudi realitzat sobre un púlper amb rotor helicoidal, a l'annex 4.5.2 per l'estudi realitzat sobre un púlper amb rotor pla.

Referent al púlper helicoidal s'ha pogut observar que existeix un comportament diferenciat del número de potència  $N_p$  en funció de la velocitat d'agitació del púlper  $n$  dependent del règim hidrodinàmic (figura 4.5.5). Per velocitats d'agitació baixes ( $n < 10$  rev/s), s'observa un augment considerable del número de potència  $N_p$ . Aquest comportament únicament es dona quan s'està treballant en un règim hidrodinàmic laminar ( $Re < 1000$ ). En canvi, quan es treballa a velocitats d'agitació majors a 10 rev/s, s'observa un valor constant del  $N_p$ .

També existeix una dependència de la viscositat del fluid vers el número de potència. Com es pot veure en el gràfic, quan major és la concentració de glicerina (fluid més viscos que l'aigua), major és el número de potència. Obtenint-se uns valors màxims de



12,259 per una concentració de glicerina del 100%, 5,405 per una concentració del 80% i 3,141 per una concentració del 60% (annex A4.5.1).



**Figura 4.5.5:** Evolució de número de potència  $N_p$  en funció de la velocitat d'agitació (rev/s) i el percentatge en pes de glicerina en la dissolució per un rotor helicoidal.

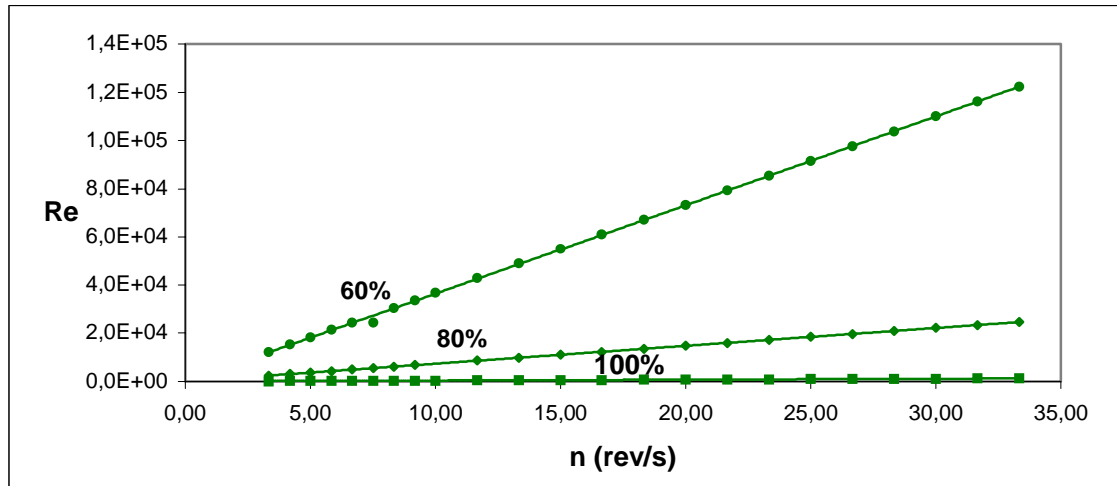
Anem ara a fixar-nos en el comportament del número de Reynolds **Re** amb la velocitat d'agitació del púlper **n**. La gràfica de la figura 4.5.6 mostra que per concentracions de glicerina elevades, el règim hidrodinàmic és baix, pràcticament laminar en la seva totalitat ( $Re^{(1)} < 1000$ ). Mentre que per concentracions baixes de glicerina (alt contingut d'aigua) s'obté uns números de Reynolds majors i dins el règim turbulent.

De la gràfica de la figura 4.5.6 també es pot dir que els fluids més viscosos, en el nostre cas els que tenen un major percentatge de glicerina, són els que posseeixen un número **Re** més constant i independent a la variació d'agitació del púlper. En canvi, els fluids menys viscosos són els que experimenten un creixement més accentuat del número **Re** quan augmenta la velocitat d'agitació.

<sup>(1)</sup> Segons el valor de  $Re$  es poden distingir tres règims hidrodinàmics: Laminar, transició i turbulent.

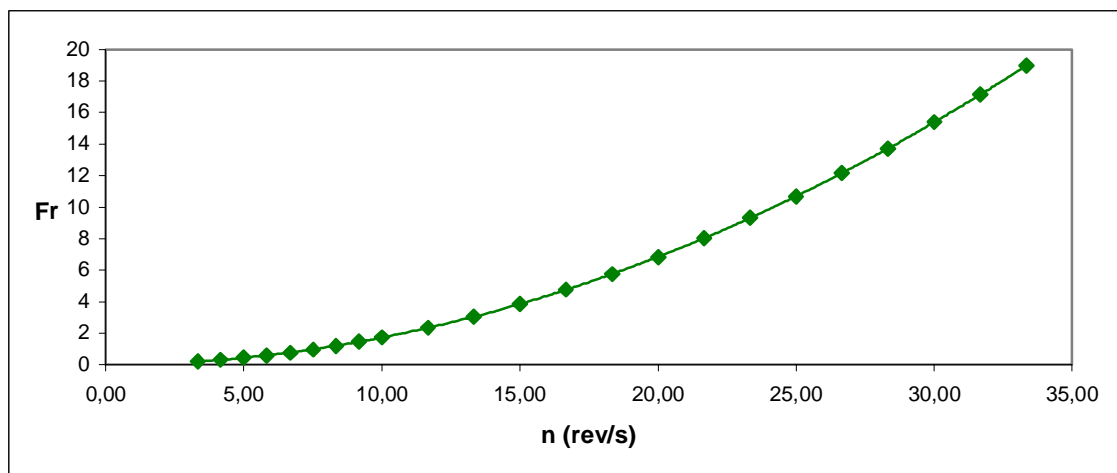
$Re < 10$	Règim laminar
$10 < Re < 1000$	Règim transició
$Re > 1000$	Règim turbulent

En la gràfica és pot observar un augment de  $1,22 \cdot 10^4$  a  $1,22 \cdot 10^5$  en el número **Re**, del fluid que contenia un 60% de glicerina, en front un augment de la velocitat d'agitació de 3,33 rev/s a 33,3 rev/s.



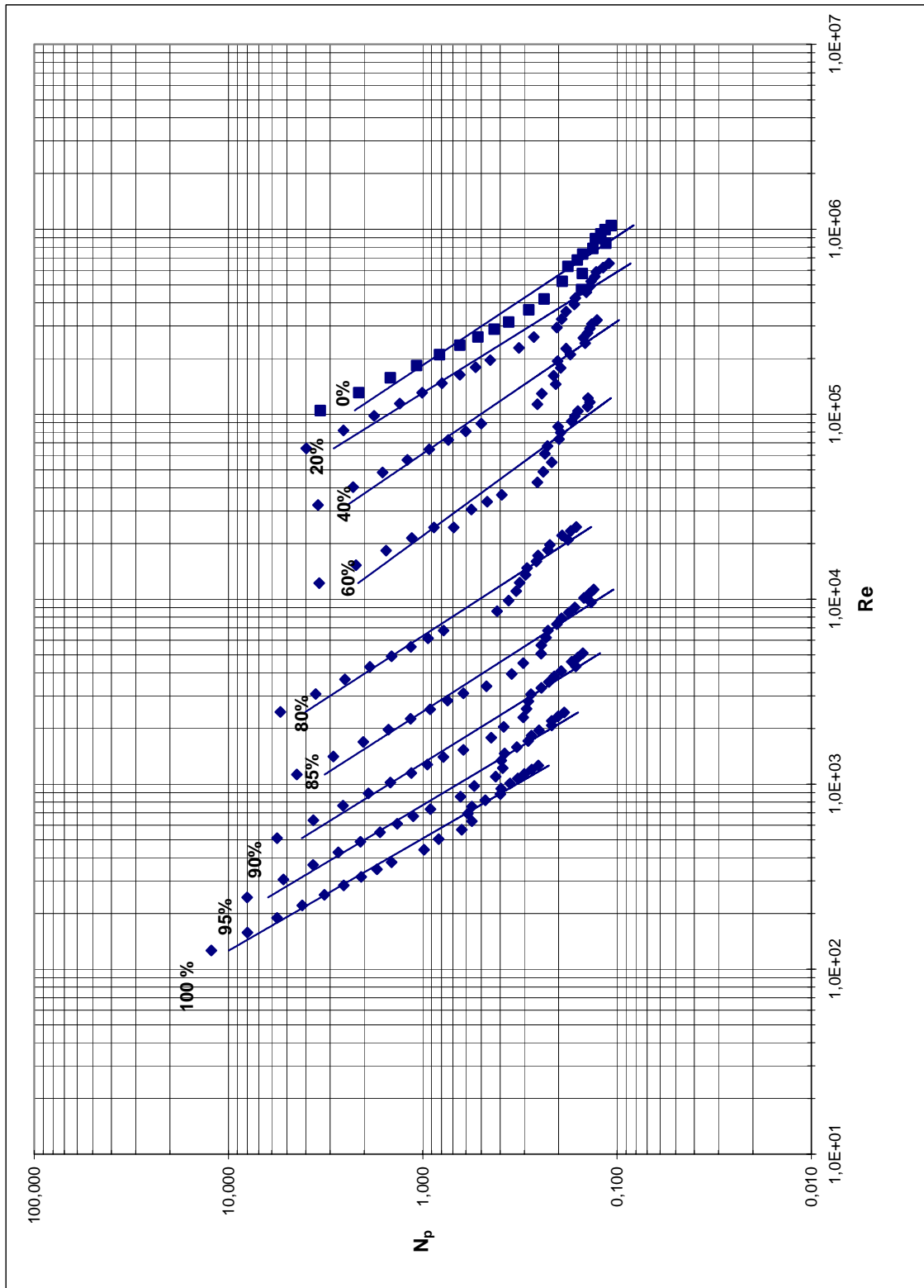
**Figura 4.5.6:** Evolució del número de Reynolds **Re** en funció de la velocitat d'agitació (rev/s) i el percentatge en pes de glicerina en la dissolució per un rotor helicoidal.

Per últim, es representa a la gràfica de la figura 4.5.7 el número de Froude en funció de la velocitat d'agitació del púlper. Aquest és un paràmetre que únicament depèn de la geometria del púlper, tal com ja indicava l'equació que el defineix (eq. 4.5.4). En la representació que segueix es pot observar que **Fr** augmenta de manera potencial amb la velocitat d'agitació del púlper.



**Figura 4.5.7:** Evolució del número de Froude **Fr** en funció de la velocitat d'agitació (rev/s).

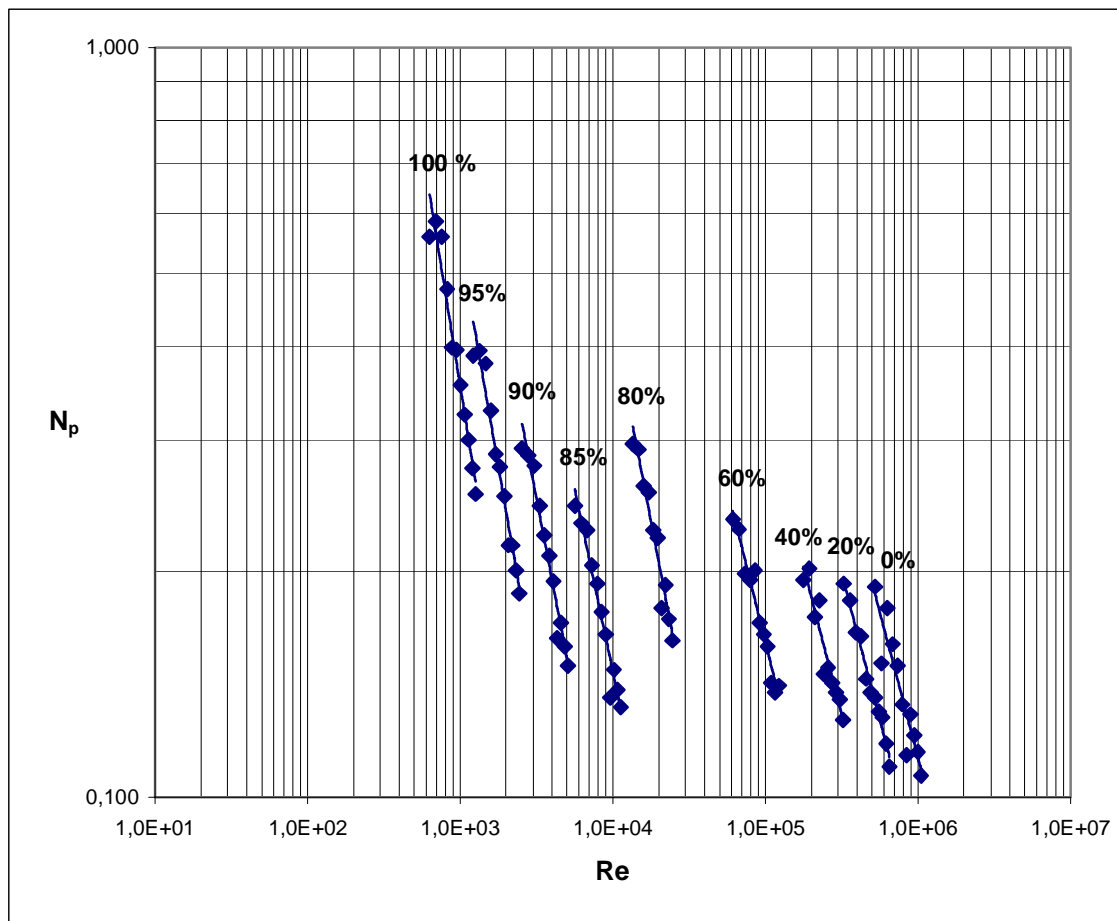
En aquests moments, una vegada definits els números de potència  $N_p$  i de Reynolds  $Re$  es poden representar les corbes característiques que modelitzen la hidrodinàmica del nostre púlper amb un rotor de tipus helicoidal. En primer lloc, a la gràfica 4.5.8 es mostra la relació  $N_p-Re$  pels diferents tipus de fluids estudiats (diferents concentració de glicerina) a continuació, la gràfica 4.5.11 mostrarà la mateixa relació però ara en funció de les diferents velocitats d'agitació de la màquina, representant-se així les diferents corbes característiques del nostre púlper.



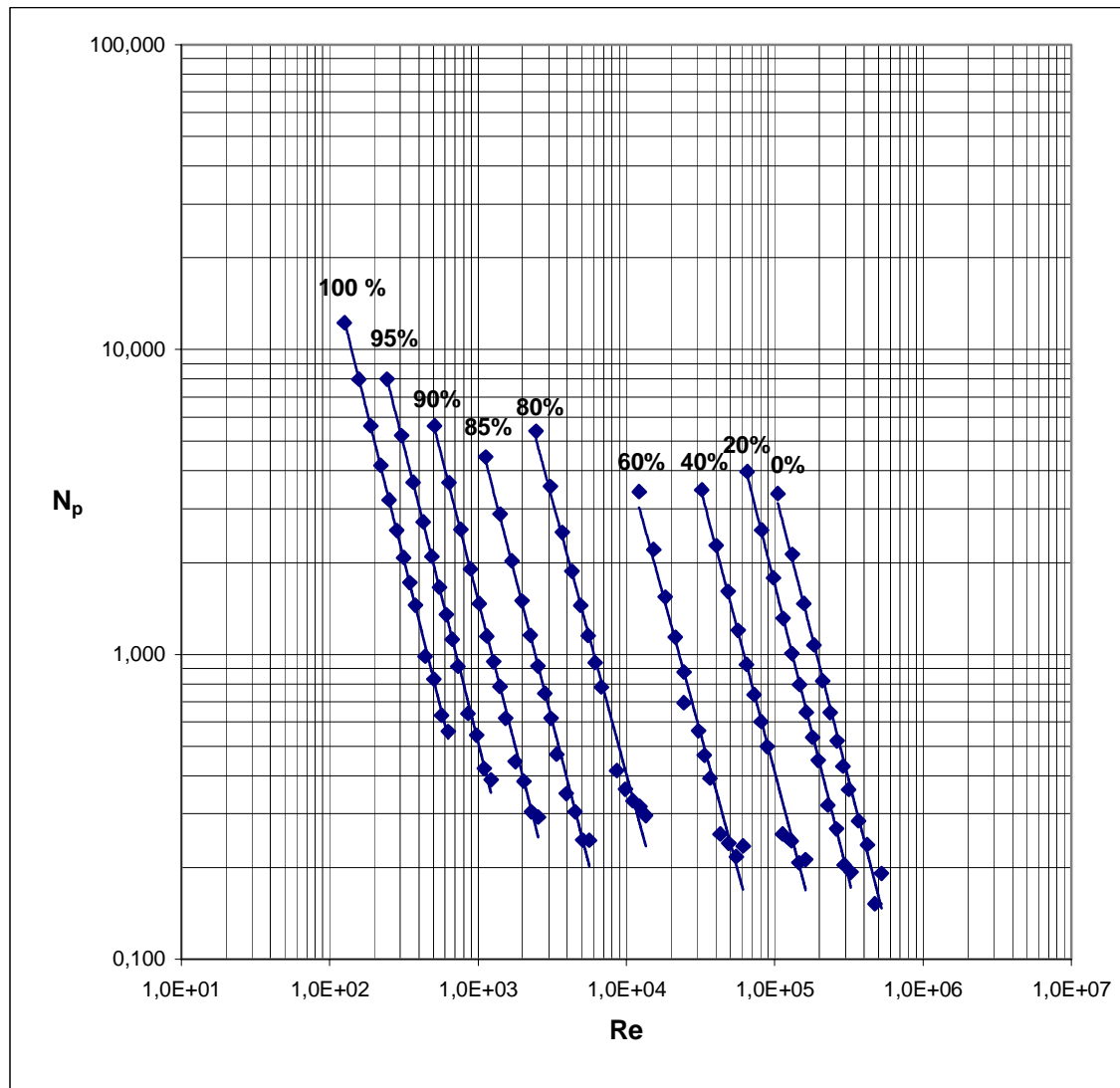
**Figura 4.5.8:** Corbes característiques d'un púlpser tipus helicoidal per diferents fluids amb una concentració de glicerina compresa entre el 0 i el 100%;  $d=0,1676\text{m}$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ , volum=20L.

Com es pot observar en la gràfica de la figura 4.5.8 existeixen dues tendències ben diferenciades, les quals coincideixen amb dos tipus de models que s'utilitzen per caracteritzar aquest púlper, tal com es veurà en l'apartat que segueix (apartat 4.5.1.1). La frontera entre aquests dos models és el número de potència  $N_p$ , existint un model per  $N_p$  baixos i un altre per  $N_p$  alts. Aquest número de potència límit o frontera coincideix amb el que s'obté treballant amb una velocitat d'agitació de 16,67 rev/s, tal com s'havia comentat a la figura 4.5.5, on s'havia determinat que estava a prop de 10 rev/s.

Per tant, les noves corbes característiques pels dos comportaments del púlper, són les que es mostren a la gràfica de la figura 4.5.9 per velocitats d'agitació inferiors a 16,67 rev/s i a la gràfica de la figura 4.5.10 per velocitats d'agitació superiors a 16,67 rev/s.

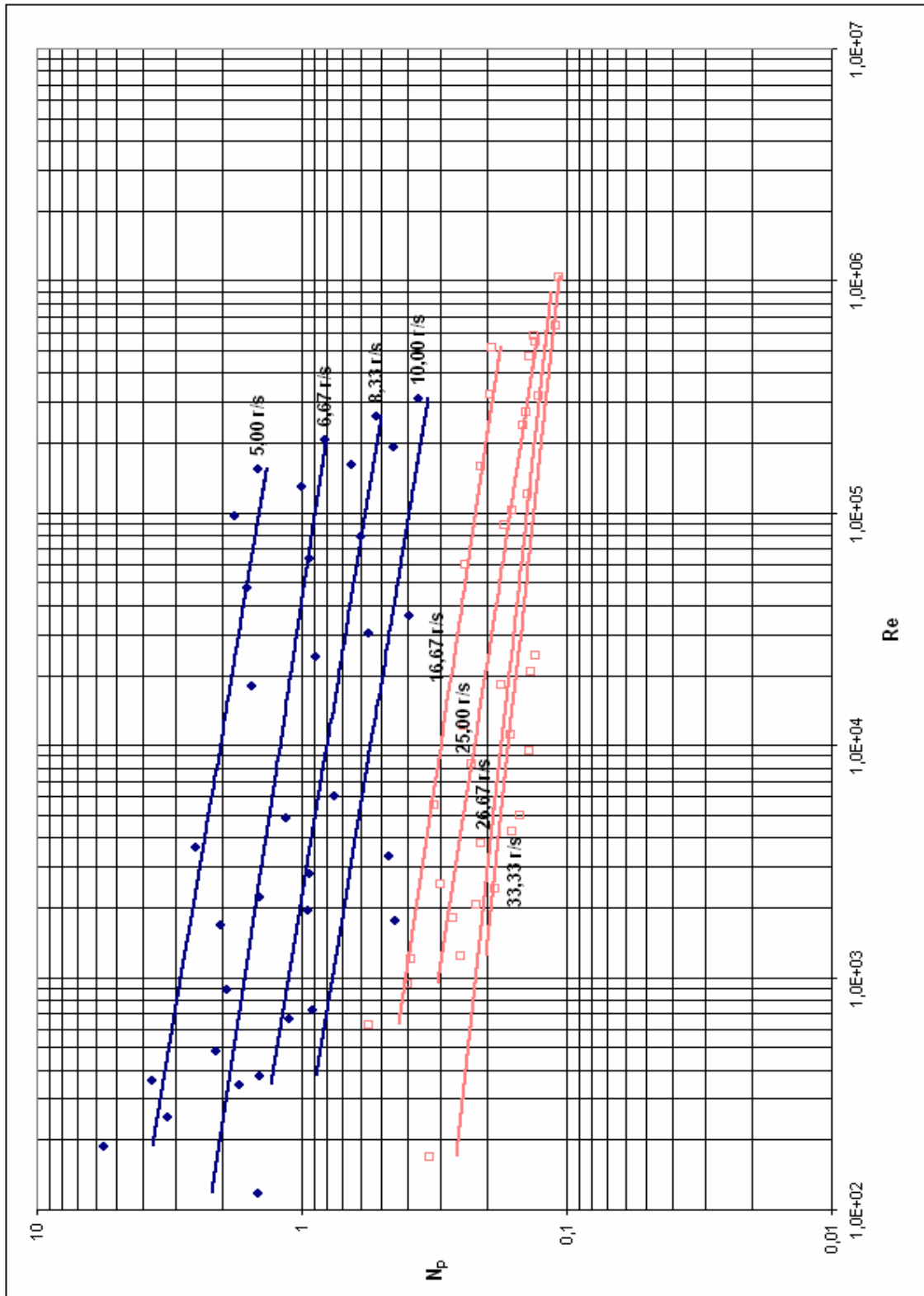


**Figura 4.5.9:** Corbes característiques d'un púlper tipus helicoidal per diferents fluids amb una concentració de glicerina compresa entre el 0 i el 100%;  $d=0,1676m$ ,  $T=25^{\circ}C$ , volum=20L i velocitats d'agitació  $n < 16,67$  rev/s



**Figura 4.5.10:** Corbes característiques d'un púlper tipus helicoidal per diferents fluids amb una concentració de glicerina compresa entre el 0 i el 100%;  $d=0,1676\text{m}$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ , volum=20L i velocitats d'agitació  $n > 16,67\text{ rev/s}$

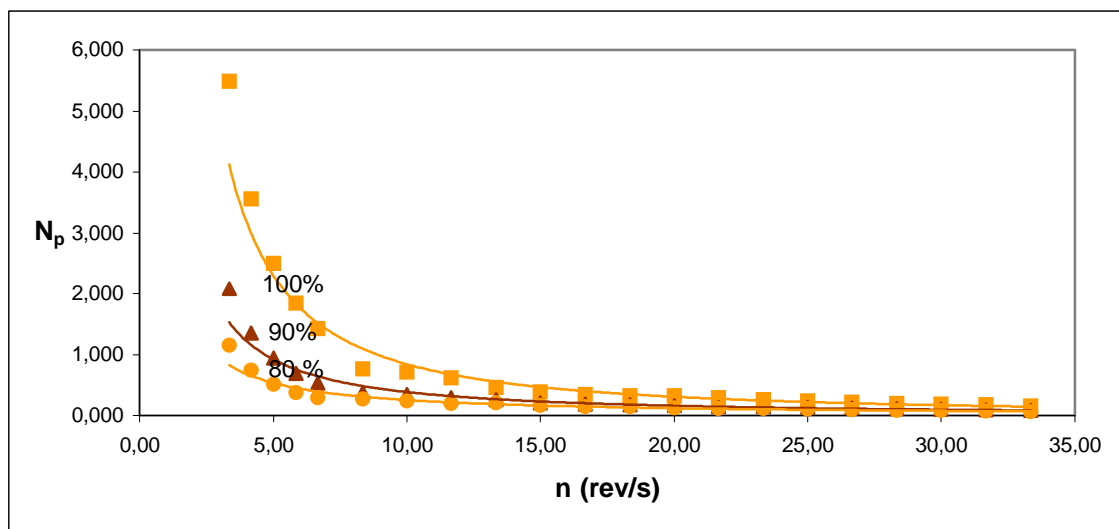
Per últim es representa la variació del nombre de potència  $N_p$  en funció del nombre de Reynolds  $Re$  per les diferents velocitats d'agitació. Com es pot veure en el gràfic de la figura 4.5.11, existeixen dos règims o comportaments depenent de la velocitat d'agitació del púlper



**Figura 4.5.11:** Corbes característiques d'un púlpers tipus helicoidal per diferents velocitats d'agitació compreses entre 5 i 33.33 rev/s;  $d=0,1676m$ ,  $T=25^{\circ}C$ , volum=20L.

Si es realitza el mateix estudi però sobre un púlper amb rotor pla (annex A4.5.2) s'obtenen les evolucions gràfiques següents. Per una banda, el número de potència  $N_p$  en funció de la velocitat d'agitació del púlper  $n$  segueix un comportament molt similar al que presentava el rotor helicoidal (figura 4.5.12). És a dir, per velocitats d'agitació baixes, s'observa una reducció considerable del número de potència, mentre que treballant a velocitats majors s'obté un valor constant del  $N_p$ .

De la mateixa manera, per fluids més viscosos, major contingut de glicerina, major és el número de potència. Obtenint-se uns valors màxims de 5,5 per una concentració de glicerina del 100% i 3,33 rev/s, 2,1 per una concentració del 90% i 1,2 per una concentració del 80%. Aquests valors són inferiors als que s'obtenen amb el rotor helicoidal. Cal recordar que el número de potència és el coeficient d'arrossegament de l'agitador en el sí del fluid, per tant, és lògic obtenir uns números de potència majors quan es treballa amb un rotor helicoidal, ja que aquest té una major superfície d'arrossegament.

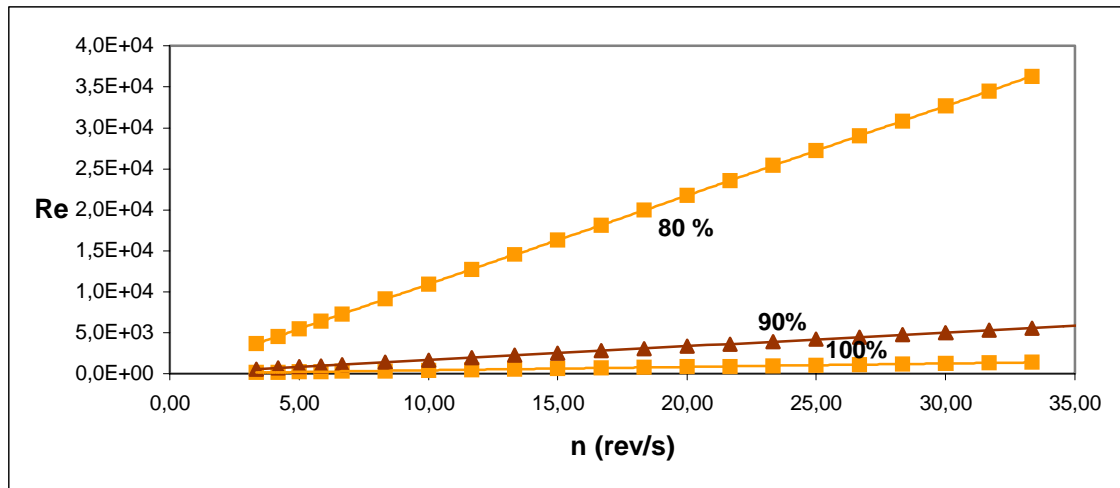


**Figura 4.5.12:** Evolució del número de potència  $N_p$  en funció de la velocitat d'agitació i el percentatge en pes de glicerina en la dissolució per un rotor pla.

En un rotor pla, el número de Reynolds  $Re$  en funció de la velocitat d'agitació  $n$  és el que es mostra en la figura 4.5.13 Com es pot observar, l'evolució de  $Re$  amb  $n$  és del

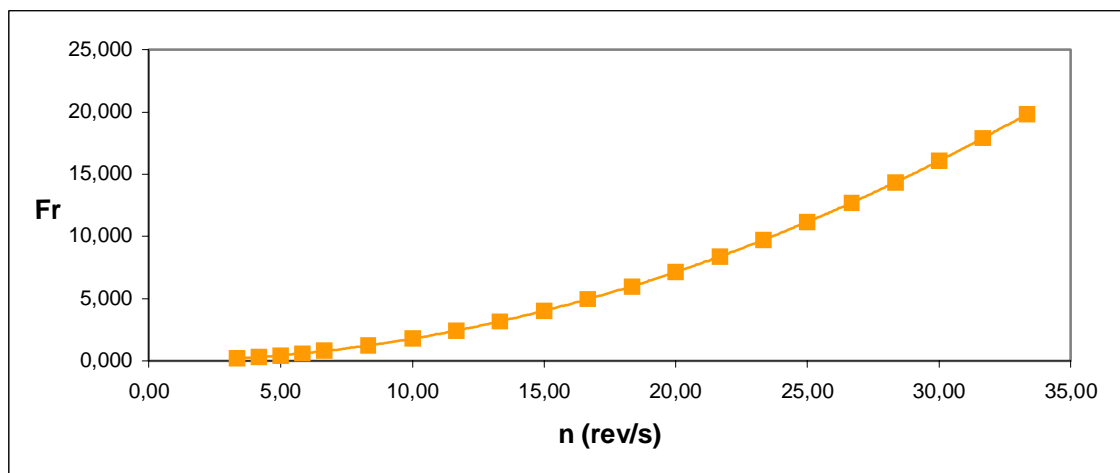


tipus lineal i creixent amb la velocitat. Aquest tipus de rotor, a diferència del rotor helicoidal aconsegueix uns valors de **Re** majors, per tant és més senzill assolir el règim turbulent a baixes revolucions.



**Figura 4.5.13:** Evolució del número de Reynolds **Re** en funció de la velocitat d'agitació i el percentatge en pes de glicerina en la dissolució per un rotor pla.

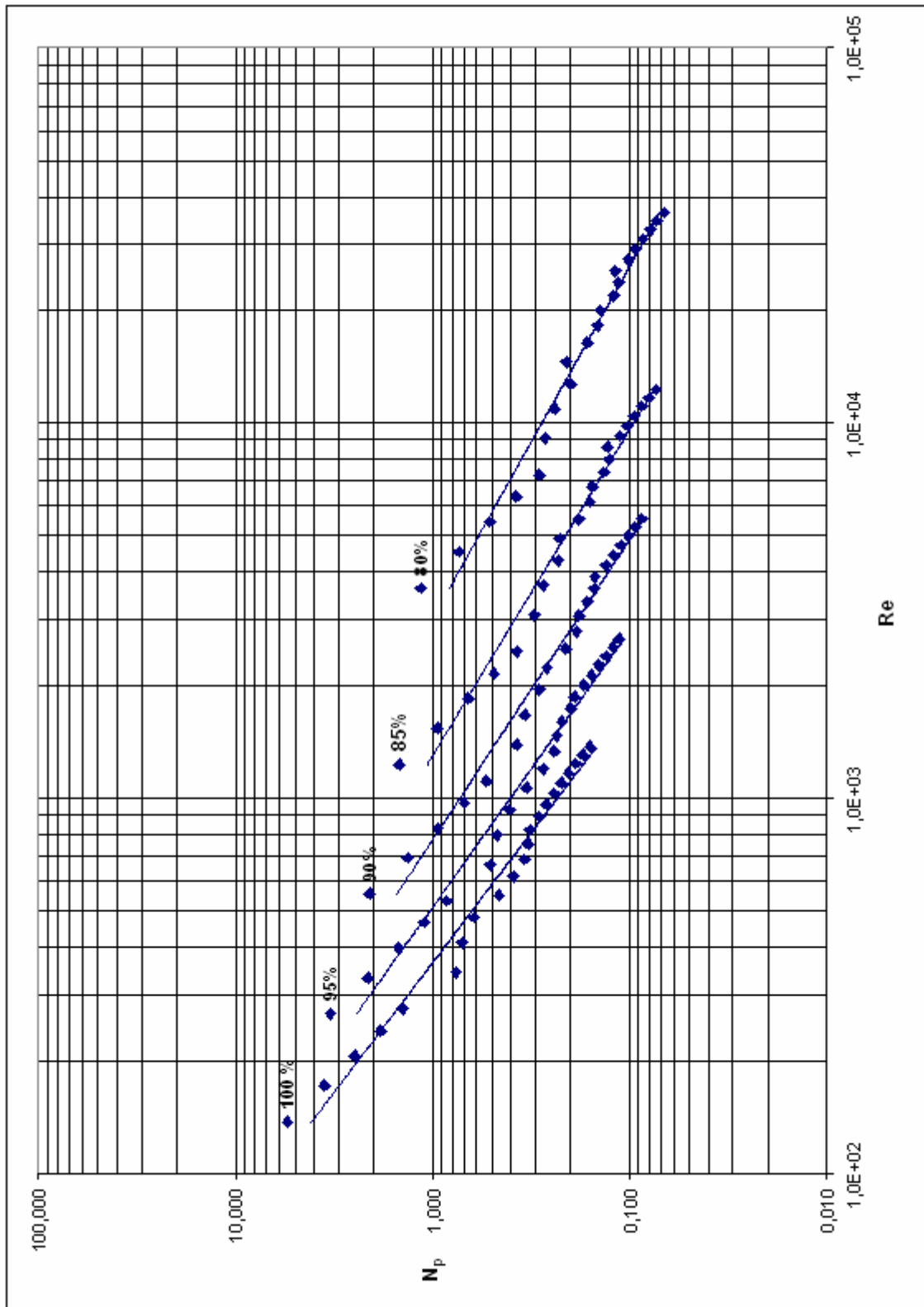
El número de Froude, com ja s'havia comentat anteriorment és un paràmetre que únicament depèn de la geometria del púlper. Per tant, amb un púlper de tipus pla s'obtenen els següents valors de **Fr** en funció de l'agitació del púlper **n** (Figura 4.5.14).



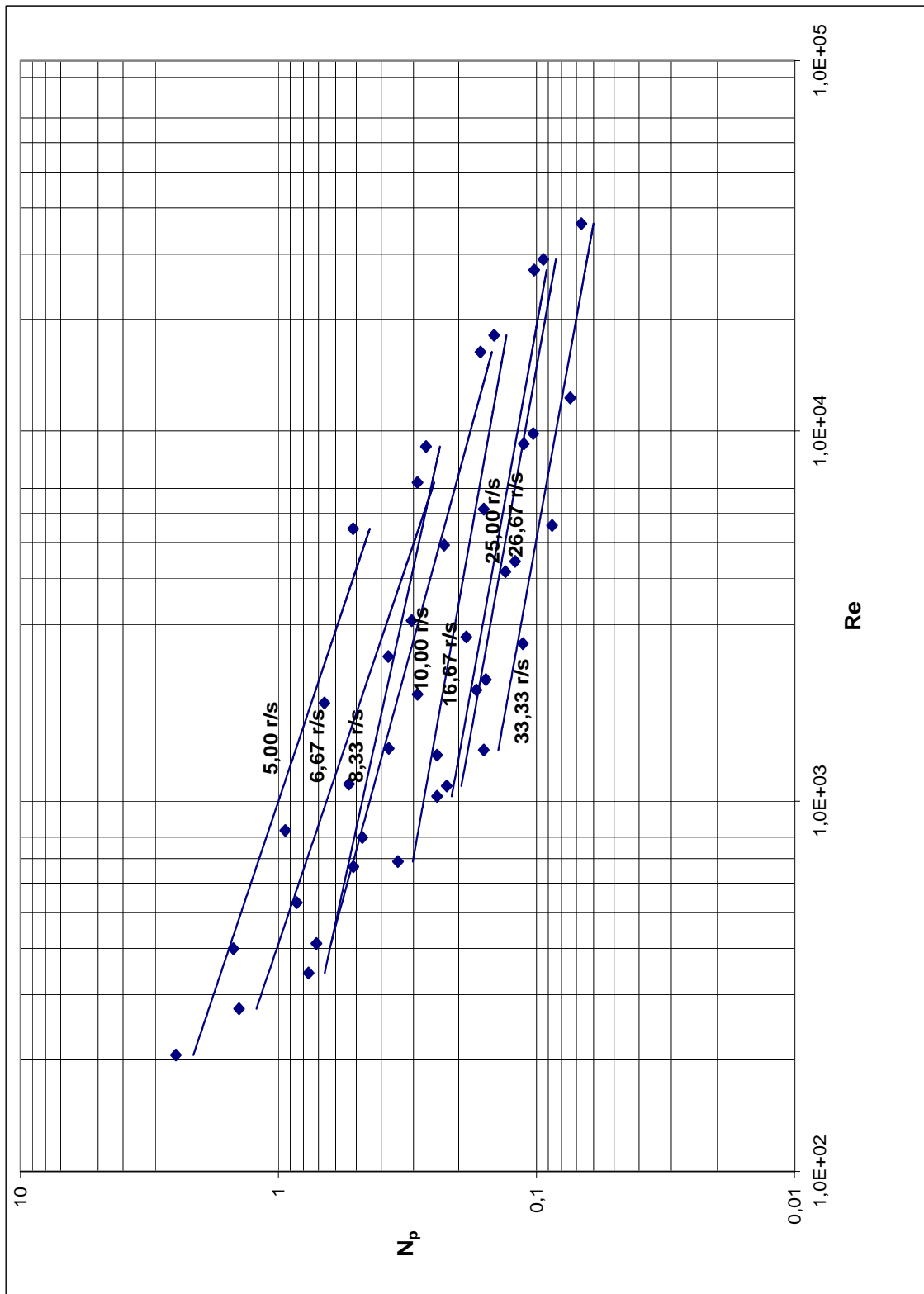
**Figura 4.5.14:** Evolució del número de Froude **Fr** en funció de la velocitat d'agitació.

Modelitzant ara la hidrodinàmica del púlper pla, s'obtenen les següents corbes característiques: la gràfica de la figura 4.5.15 representa la relació  $N_p-Re$  pels diferents tipus de fluids estudiats (diferent concentració de glicerina), mentre que la gràfica 4.5.16 representa la mateixa relació  $N_p-Re$  però ara per diferents velocitats d'agitació del púlper.

A la vista de la gràfica de la figura 4.5.15 i 4.5.16 i, a diferència de la que s'obté pel rotor helicoidal, s'observa que existeix un comportament únic que caracteritza el funcionament del púlper amb rotor pla.



**Figura 4.5.15:** Corbes característiques d'un púlper tipus pla per diferents fluids amb una concentració de glicerina compresa entre el 0 i el 100%,  $d=0,157$  m,  $T=25^\circ\text{C}$ , volum=20L.



**Figura 4.5.16:** Corbes característiques d'un púlper tipus pla per diferents fluids amb una velocitat d'agitació compresa entre 5,00 i 33,33 rev/s;  $d=0,175$  m,  $T=25^{\circ}\text{C}$ , volum=20L.

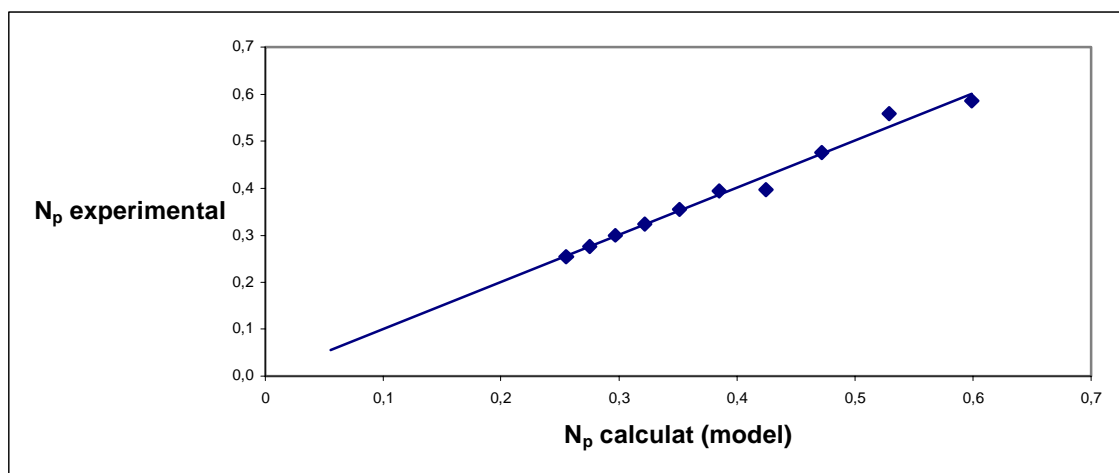
#### 4.5.1.1. Modelització del púlper equipat amb rotor helicoidal

La modelització del púlper, malgrat les anàlisis efectuades anteriorment, comporta obtenir un model  $N_p = K \cdot Re^X \cdot Fr^Y$  que respongui als resultats obtinguts amb els diferents fluids estudiats (100, 95, 90, 85, 80, 60, 40, 20 i 0% de glicerina). El model plantejat globalment no és matemàticament possible, perquè quan es realitza la regressió multilinear, els paràmetres **K**, **X** i **Y** tenen un coeficient de correlació de 0,6 amb un error estàndard del 0,4. Per tant el model que s'obté, s'ajusta a les dades obtingudes experimentalment d'una forma molt deficient.

La primera alternativa ha estat disminuir les restriccions i treballar amb menys tipus de fluids en base glicerina-aigua. Quan es treballa en el interval de concentracions de glicerina comprès entre el 100 i el 80% s'obté un model amb un coeficient de correlació de 0,989 i un error estàndard de 0,34 per un interval de velocitats del rotor comprès 18,33 i 33,33 rev/s. L'equació corresponent resulta ser:

$$N_p = 7,76 \cdot Re^{-0,232} \cdot Fr^{-0,597} \quad (\text{eq. 4.5.5})$$

Aquest model, és aplicable per un interval de consum de potències netes comprès entre 431 i 1566 W, treballant a les diferents fraccions massiques però sempre amb un volum total de 20 L. Per quantificar la bondat d'aquest model, s'ha representat en la gràfica de la figura 4.5.17, la correlació entre el valor  $N_p$  calculat a partir del model i el  $N_p$  obtingut experimentalment.



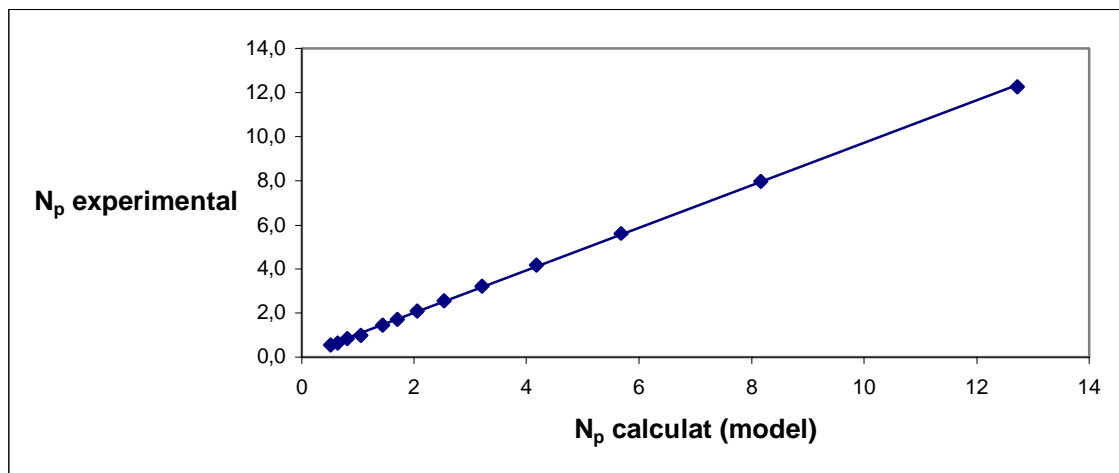
**Figura 4.5.17:** Correlació entre el  $N_p$  calculat segons el model vàlid per velocitats d'agitació compreses entre 18,33 i 33,33 rev/s pel rotor helicoidal i el  $N_p$  obtingut experimentalment.

Com es pot veure en el gràfic, la correlació és molt bona, obtenint-se una recta amb pendent igual a la unitat i un coeficient de correlació del 0,98.

De la mateixa manera per l'interval 3,33 a 16,67 rev/s i per un consum de potència neta entre 0 i 430 W, i sempre per un volum total de 20 L,  $N_p$  es pot expressar segons l'expressió que segueix:

$$N_p = 12,428 \cdot Re^{-0,287} \cdot Fr^{-0,85} \quad (\text{eq. 4.5.6})$$

La correlació que relaciona el valor de  $N_p$  experimental amb el modelat és la que es mostra a la gràfica de la figura 4.5.18. Com es pot veure, la correlació continua essent molt bona. En aquest cas, el coeficient de correlació es situa a 0,99.



**Figura 4.5.18:** Correlació entre el  $N_p$  calculat segons el model vàlid per velocitats d'agitació compreses entre 18,33 i 33,33 rev/s pel rotor helicoidal i el  $N_p$  obtingut experimentalment.

La substitució en els respectius models de  $Re$  i  $Fr$  porta a les següents expressions de la viscositat en funció de la potència neta consumida per la suspensió, pes específic de la suspensió i nombre de voltes del rotor helicoidal (veure l'apartat de materials i mètodes).

$$\mu = 6,08 \cdot 10^6 \cdot P_n^{4,31} \cdot \rho^{-3,31} \cdot n^{-6,78}, \quad [n: 18,33 \sim 33,33 \text{ rev/s}] \quad (\text{eq. 4.5.7})$$

$$\mu = 8,25 \cdot 10^2 \cdot P_n^{3,48} \cdot \rho^{-2,48} \cdot n^{-3,53}, \quad [n: 3,33 \sim 16,67 \text{ rev/s}] \quad (\text{eq. 4.5.8})$$

D'acord amb Metzner i Otto (1957), per fluids no newtonians, com és el cas de les suspensions papereres,  $\mu$  es pot substituir per  $\mu_a$ , viscositat aparent. En aquest cas, s'ha optat per englobar i generalitzar el concepte de viscositat aparent, mitjançant el factor de cisallament que d'ara en endavant s'anomenarà  $\lambda$ .

$$\lambda = 6,08 \cdot 10^6 \cdot P_n^{4,31} \cdot \rho^{-3,31} \cdot n^{-6,78}, \quad [n: 18,33 \sim 33,33 \text{ rev/s}] \quad (\text{eq. 4.5.9})$$

$$\lambda = 8,25 \cdot 10^2 \cdot P_n^{3,48} \cdot \rho^{-2,48} \cdot n^{-3,53}, \quad [n: 3,33 \sim 16,67 \text{ rev/s}] \quad (\text{eq. 4.5.10})$$

Per últim, d'acord també amb l'apartat de materials i mètodes, les energies corresponents que es deriven de les equacions 4.5.9 i 4.5.10, seran respectivament:

$$E_n = 2,66 \cdot 10^{-2} \cdot \rho^{0,768} \cdot n^{1,57} \cdot \lambda^{0,23} \cdot t_D, \quad [n: 18,33 \sim 33,33 \text{ rev/s}] \quad (\text{eq. 4.5.11})$$

$$E_n = 1,45 \cdot 10^{-2} \cdot \rho^{0,712} \cdot n^{1,014} \cdot \lambda^{0,287} \cdot t_D, \quad [n: 3,33 \sim 16,67 \text{ rev/s}] \quad (\text{eq. 4.5.12})$$

## **ANNEX 4.5.1.**

### ***Púlper rotor helicoïdal***





### A4.5.1.1. Introducció

En aquest annex es mostraran els diferents resultats obtinguts a l'hora de modelitzar el púlper de tipus helicoidal a partir del número de potència **N<sub>p</sub>**, el número de Reynolds **Re** i el número de Froude **Fr**.

Per calcular aquests paràmetres cal conèixer la potència neta mitjana **P<sub>n</sub>**, el pes específic del fluid **ρ**, la velocitat del rotor **n**, el diàmetre equivalent del rotor **d**, la viscositat dinàmica del fluid **μ**. Les expressions que defineixen els paràmetres acabats de comentar són les que segueixen:

$$N_p = \frac{P_n}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} \quad (\text{eq. A4.5.1})$$

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu} \quad (\text{eq. A4.5.2})$$

$$Fr = \frac{d \cdot n^2}{g} \quad (\text{eq. A4.5.3})$$

Les condicions de l'assaig són les que s'indiquen a continuació: temperatura de 25°C, volum tractat de 20 l i un diàmetre del rotor de 0,1676 m. Les dissolucions aigua-glicerina estudiades són del 100, 95, 90, 85, 80, 60, 40, 20 i 0% en percentatge en pes.

**Taula AIV.5.1:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 100%;  $\rho = 1258,02 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,934 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	75,5310	12,259	126,113	0,190
4,17	96,2260	7,996	157,641	0,297
5,00	116,9210	5,623	189,170	0,428
5,83	137,6160	4,167	220,698	0,582
6,67	158,3110	3,212	252,226	0,760
7,50	179,0060	2,551	283,755	0,962
8,33	199,7010	2,074	315,283	1,188
9,17	220,3960	1,720	346,811	1,437
10,00	241,0910	1,449	378,340	1,710
11,67	260,17	0,985	441,396	2,328
13,33	326,85	0,829	504,453	3,04
15,00	353,5970	0,630	567,509	3,848
16,67	430,2800	0,559	630,566	4,751
18,33	600,3200	0,586	693,623	5,748
20,00	744,0100	0,559	756,679	6,841
21,67	804,6530	0,476	819,736	8,028
23,33	841,6530	0,398	882,792	9,311
25,00	1026,2200	0,395	945,849	10,689
26,67	1121,3200	0,355	1008,906	12,161
28,33	1225,0090	0,324	1071,962	13,729
30,00	1345,5980	0,300	1135,019	15,392
31,67	1450,1330	0,275	1198,075	17,150
33,33	1566,0030	0,254	1261,132	19,002

**Taula AIV.5.2:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 95%;  $\rho = 1245,15 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,4774 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	48,8410	8,009	244,211	0,190
4,17	62,1700	5,219	305,264	0,297
5,00	75,4990	3,668	366,317	0,428
5,83	88,8260	2,718	427,370	0,582
6,67	102,1590	2,094	488,423	0,760
7,50	155,4850	1,662	549,476	0,962
8,33	128,8120	1,352	610,529	1,188
9,17	142,1440	1,121	671,582	1,437
10,00	150,4420	0,914	732,634	1,710
11,67	167,0740	0,639	854,740	2,328
13,33	212,0320	0,543	976,846	3,040
15,00	234,4260	0,422	1098,952	3,848
16,67	296,0410	0,388	1221,057	4,751
18,33	399,6410	0,394	1343,163	5,748
20,00	498,6440	0,379	1465,269	6,841
21,67	549,9770	0,328	1587,374	8,028
23,33	600,7110	0,287	1709,480	9,311
25,00	711,2050	0,276	1831,586	10,689
26,67	787,7980	0,252	1953,692	12,161
28,33	811,0960	0,217	2075,797	13,729
30,00	966,7010	0,217	2197,903	15,392
31,67	1049,8200	0,201	2320,009	17,150
33,33	1143,2210	0,187	2442,115	19,002

**Taula AIV.5.3:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 90%;  $\rho = 1221 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,2263 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

<b>n (rev/s)</b>	<b>Pn (w)</b>	<b><math>N_p</math></b>	<b>Re</b>	<b>Fr</b>
3,33	33,9500	5,625	509,745	0,190
4,17	43,1500	3,661	637,181	0,297
5,00	52,3600	2,571	764,617	0,428
5,83	61,5600	1,904	892,054	0,582
6,67	70,7700	1,466	1019,490	0,760
7,50	79,9700	1,146	1146,926	0,962
8,33	89,1700	0,946	1274,362	1,188
9,17	98,3800	0,784	1401,799	1,437
10,00	100,5800	0,617	1529,235	1,710
11,67	115,2100	0,445	1784,107	2,328
13,33	148,0200	0,383	2038,980	3,040
15,00	167,3300	0,304	2293,852	3,848
16,67	220,3800	0,292	2548,725	4,751
18,33	286,9300	0,286	2803,597	5,748
20,00	360,8100	0,277	3058,470	6,841
21,67	406,5700	0,245	3313,342	8,028
23,33	464,0600	0,224	3568,215	9,311
25,00	533,6500	0,210	3823,087	10,689
26,67	598,7300	0,194	4077,960	12,161
28,33	602,8400	0,163	4332,832	13,729
30,00	752,2800	0,171	4587,705	15,392
31,67	823,8900	0,159	4842,577	17,150
33,33	904,4100	0,150	5097,449	19,002

**Taula AIV.5.4:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 85%;  $\rho = 1218,17 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,1012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	26,5200	4,444	1127,569	0,190
4,17	33,6700	2,888	1409,461	0,297
5,00	40,8200	2,026	1691,353	0,428
5,83	47,9700	1,500	1973,246	0,582
6,67	55,1300	1,154	2255,138	0,760
7,50	62,2800	0,916	2537,030	0,962
8,33	69,4300	0,744	2828,922	1,188
9,17	76,5800	0,617	3100,814	1,437
10,00	75,7400	0,470	3382,707	1,710
11,67	89,3700	0,349	3946,491	2,328
13,33	116,1300	0,304	4510,275	3,040
15,00	133,9000	0,246	5074,060	3,848
16,67	182,6900	0,245	5637,844	4,751
18,33	230,7800	0,232	6201,629	5,748
20,00	292,1400	0,227	6765,413	6,841
21,67	335,1200	0,204	7329,198	8,028
23,33	395,9800	0,193	7892,982	9,311
25,00	445,2000	0,177	8456,766	10,689
26,67	504,5300	0,165	9020,551	12,161
28,33	499,0800	0,136	9584,335	13,729
30,00	645,4500	0,148	10148,120	15,392
31,67	711,3300	0,139	10711,904	17,150
33,33	785,4300	0,132	11275,689	19,002

**Taula AIV.5.5:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 80%;  $\rho = 1209,42 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,034 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

<b>n (rev/s)</b>	<b>Pn (w)</b>	<b><math>N_p</math></b>	<b>Re</b>	<b>Fr</b>
3,33	31,9130	5,405	2459,030	0,190
4,17	41,0280	3,558	3073,780	0,297
5,00	50,1430	2,516	3688,540	0,428
5,83	59,2580	1,873	4303,300	0,582
6,67	68,3730	1,448	4918,050	0,760
7,50	77,4880	1,152	5532,810	0,962
8,33	86,6030	0,939	6147,570	1,188
9,17	95,7180	0,780	6762,320	1,437
11,67	105,0650	0,415	8606,590	2,328
13,33	136,3330	0,361	9836,110	3,040
15,00	177,8980	0,331	11065,620	3,848
16,67	234,0430	0,317	12295,130	4,751
18,33	291,1080	0,296	13524,650	5,748
20,00	371,6180	0,291	14754,160	6,841
21,67	421,2840	0,260	15983,680	8,028
23,33	516,2770	0,255	17213,190	9,311
25,00	565,1100	0,227	18442,700	10,689
26,67	670,8900	0,222	19672,220	12,161
28,33	650,3400	0,179	20901,730	13,729
30,00	826,0500	0,192	22131,240	15,392
31,67	874,1100	0,173	23360,760	17,150
33,33	956,1200	0,162	24590,270	19,002

**Taula AIV.5.6:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 60%;  $\rho = 1151,05 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,0082 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

<b>n (rev/s)</b>	<b>Pn (w)</b>	<b><math>N_p</math></b>	<b>Re</b>	<b>Fr</b>
3,33	19,2452	3,414	12219,470	0,190
4,17	24,2952	2,206	15274,000	0,297
5,00	29,3452	1,542	18329,205	0,428
5,83	34,3952	1,138	21384,073	0,582
6,67	39,4452	0,875	24438,940	0,760
7,50	44,4952	0,693	24438,808	0,962
8,33	49,5452	0,562	30548,676	1,188
9,17	54,5952	0,466	33603,543	1,437
10,00	59,6452	0,392	36658,411	1,710
11,67	62,0790	0,257	42768,146	2,823
13,33	86,4970	0,240	48877,881	3,040
15,00	111,3850	0,217	54987,616	3,848
16,67	165,8800	0,235	61097,351	4,751
18,33	213,4910	0,228	67207,086	5,748
20,00	242,8740	0,199	73316,821	6,841
21,67	302,3400	0,195	79426,558	8,028
23,33	387,8550	0,201	85536,292	9,311
25,00	406,1845	0,171	91646,027	10,689
26,67	476,2450	0,165	97755,762	12,161
28,33	549,2030	0,159	103865,497	13,729
30,00	582,3160	0,142	109975,232	15,392
31,67	668,6598	0,138	116084,967	17,150
33,33	793,8440	0,141	122194,702	19,002



**Taula AIV.5.7:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 40%;  $\rho = 1097,1 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,00318 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	18,6048	3,462	32303,224	0,190
4,17	23,9148	2,279	40379,030	0,297
5,00	29,2248	1,611	48454,836	0,428
5,83	34,5348	1,199	56530,642	0,582
6,67	39,8448	0,927	64606,448	0,760
7,50	45,1548	0,738	72682,254	0,962
8,33	50,4648	0,601	80758,060	1,188
9,17	55,7748	0,499	88833,866	1,437
11,67	59,1150	0,257	113061,284	2,328
13,33	83,8820	0,244	129212,896	3,040
15,00	101,4450	0,207	145364,508	3,848
16,67	142,4800	0,212	161516,120	4,751
18,33	174,6510	0,195	177667,732	5,748
20,00	234,8780	0,202	193819,344	6,841
21,67	257,1040	0,174	209970,956	8,028
23,33	337,4340	0,183	226122,568	9,311
25,00	331,5170	0,146	242274,180	10,689
26,67	408,7550	0,149	258425,792	12,161
28,33	468,9296	0,142	274577,404	13,729
30,00	539,7826	0,138	290729,016	15,392
31,67	621,7090	0,135	306880,028	17,150
33,33	680,6440	0,127	323032,240	19,002

**Taula AIV.5.8:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 20%;  $\rho = 1045,25 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,0015 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	20,3571	3,976	65246,270	0,190
4,17	25,5671	2,557	81557,838	0,297
5,00	30,7771	1,781	97869,405	0,428
5,83	35,9871	1,312	114180,973	0,582
6,67	41,1971	1,006	130492,541	0,760
7,50	46,4071	0,796	146804,108	0,962
8,33	51,6171	0,645	163115,676	1,188
9,17	56,8271	0,534	179427,243	1,437
10,00	62,0371	0,449	195738,811	1,710
11,67	70,2860	0,320	228361,946	2,328
13,33	87,8200	0,268	260985,081	3,040
15,00	94,9900	0,204	293608,216	3,848
16,67	123,2100	0,193	326231,352	4,751
18,33	155,9600	0,183	358854,487	5,748
20,00	183,5050	0,166	391477,622	6,841
21,67	230,9490	0,164	424100,757	8,028
23,33	252,6970	0,144	456723,892	9,311
25,00	297,0300	0,138	489347,027	10,689
26,67	356,4190	0,136	521970,162	12,161
28,33	412,0080	0,130	554593,298	13,729
30,00	477,0100	0,128	587216,433	15,392
31,67	518,1700	0,118	619819,568	17,150
33,33	560,9415	0,110	652462,703	19,002

**Taula AIV.5.9:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 0%;  $\rho = 997,708 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,00089 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	16,4542	3,367	104963,964	0,190
4,17	20,3342	2,131	131204,954	0,297
5,00	24,2142	1,468	157445,945	0,428
5,83	28,0942	1,073	183686,936	0,582
6,67	31,9742	0,818	209927,927	0,760
7,50	35,8542	0,644	236168,918	0,962
8,33	39,7342	0,520	262409,909	1,188
9,17	43,6142	0,429	288650,900	1,437
10,00	47,4942	0,360	314891,891	1,710
11,67	59,4600	0,284	367373,872	2,328
13,33	74,0900	0,237	419855,854	3,040
15,00	67,5070	0,152	472337,836	3,848
16,67	116,8990	0,191	524819,818	4,751
18,33	122,9000	0,151	577301,800	5,748
20,00	188,4170	0,179	629783,781	6,841
21,67	215,1240	0,160	682265,763	8,028
23,33	250,6530	0,150	734747,745	9,311
25,00	274,4880	0,133	787229,727	10,689
26,67	285,0100	0,114	839711,708	12,161
28,33	387,1770	0,129	892193,690	13,729
30,00	432,4860	0,121	944675,672	15,392
31,67	483,4800	0,115	997157,654	17,150
33,33	523,1630	0,107	1049639,636	19,002

## **ANNEX 4.5.2.**

***Púlper rotor pla***



### A4.5.2.1. Introducció

Aquest annex segueix la mateixa línia de l'annex 4.5.1, a on es representaven els diferents resultats obtinguts a l'hora de modelitzar el púlper de tipus helicoidal a partir del número de potència **Np**, el número de Reynolds **Re** i el número de Froude **Fr**. En aquest annex, però es mostraran els resultats obtinguts per un rotor pla.

Les condicions de l'assaig són les que s'indiquen a continuació: temperatura de 25°C, volum tractat de 20 l i un diàmetre del rotor de 0,175 m. Les dissolucions aigua-glicerina estudiades són del 100, 95, 90, 80% en percentatge en pes.

**Taula AIV.5.10:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 100%;  $\rho = 1258,02 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,934 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	41,9768	5,489	137,498	0,198
4,17	53,2268	3,564	171,872	0,310
5,00	64,4768	2,498	206,247	0,446
5,83	75,7268	1,848	240,621	0,608
6,67	86,9768	1,422	274,995	0,794
8,33	91,3600	0,765	343,744	1,240
10,00	147,1200	0,713	412,493	1,786
11,67	202,8300	0,619	481,242	2,431
13,33	226,3100	0,462	549,991	3,175
15,00	271,0700	0,389	618,740	4,018
16,67	328,6200	0,344	687,489	4,960
18,33	418,1500	0,329	756,237	6,002
20,00	534,0500	0,323	824,986	7,143
21,67	607,6500	0,289	893,735	8,383
23,33	695,5200	0,265	962,484	9,722
25,00	783,3900	0,243	1031,233	11,161
26,67	871,2600	0,223	1099,982	12,698
28,33	959,1300	0,204	1168,731	14,335
30,00	1047,0000	0,188	1237,480	16,071
31,67	1134,8700	0,173	1306,228	17,907
33,33	1222,7400	0,160	1374,977	19,841
3,33	41,9768	5,489	137,498	0,198

**Taula AIV.5.11:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 95%;  $\rho = 1245,15 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,4774 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	24,9900	3,301	266,250	0,198
4,17	31,6100	2,138	332,820	0,310
5,00	38,2300	1,496	399,380	0,446
5,83	44,8500	1,106	465,940	0,608
6,67	51,4700	0,850	532,510	0,794
8,33	60,6500	0,513	665,630	1,240
10,00	96,6600	0,473	798,760	1,786
11,67	131,8600	0,406	931,880	2,431
13,33	161,6100	0,334	1065,010	3,175
15,00	189,5300	0,275	1198,140	4,018
16,67	299,7600	0,243	1331,260	4,960
18,33	294,2500	0,234	1464,390	6,002
20,00	360,8800	0,221	1597,520	7,143
21,67	416,0800	0,200	1730,640	8,383
23,33	495,0600	0,191	1863,770	9,722
25,00	546,2700	0,171	1996,900	11,161
26,67	607,8000	0,157	2130,020	12,698
28,33	669,3300	0,144	2263,150	14,335
30,00	730,8600	0,132	2396,270	16,071
31,67	792,3800	0,122	2529,400	17,907
33,33	853,9000	0,113	2662,530	19,841



**Taula AIV.5.12:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 90%;  $\rho = 1221 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,2263 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

<b>n (rev/s)</b>	<b>Pn (w)</b>	<b><math>N_p</math></b>	<b>Re</b>	<b>Fr</b>
3,33	15,6500	2,089	555,752	0,198
4,17	19,7200	1,348	694,690	0,310
5,00	23,8000	0,941	833,628	0,446
5,83	27,8700	0,694	972,566	0,608
6,67	31,9500	0,533	1111,504	0,794
8,33	43,7700	0,374	1389,380	1,240
10,00	68,9100	0,341	1667,256	1,786
11,67	92,8300	0,289	1945,132	2,431
13,33	126,0200	0,263	2223,008	3,175
15,00	144,6800	0,212	2500,884	4,018
16,67	175,3800	0,187	2778,760	4,960
18,33	226,1100	0,181	3056,636	6,002
20,00	265,6500	0,164	3334,512	7,143
21,67	310,7300	0,151	3612,388	8,383
23,33	384,8100	0,150	3890,264	9,722
25,00	415,8800	0,132	4168,140	11,161
26,67	462,9200	0,121	4446,016	12,698
28,33	509,9600	0,111	4723,892	14,335
30,00	557,0000	0,102	5001,768	16,071
31,67	604,0300	0,094	5279,644	17,907
33,33	651,0700	0,087	5557,520	19,841

**Taula AIV.5.13:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 85%;  $\rho = 1218,17 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,1012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	11,0000	1,484	1229,338	0,198
4,17	13,8000	0,954	1536,672	0,310
5,00	16,6100	0,664	1844,006	0,446
5,83	19,4100	0,489	2151,341	0,608
6,67	22,2200	0,375	2458,675	0,794
8,33	35,3500	0,305	3073,344	1,240
10,00	55,0900	0,275	3688,013	1,786
11,67	73,3900	0,231	4302,681	2,431
13,33	108,3000	0,228	4917,350	3,175
15,00	122,3400	0,181	5532,019	4,018
16,67	148,2900	0,160	6146,688	4,960
18,33	192,1600	0,156	6761,350	6,002
20,00	218,2100	0,136	7376,025	7,143
21,67	258,2500	0,127	7990,694	8,383
23,33	329,8900	0,130	8605,363	9,722
25,00	350,9100	0,112	9220,031	11,161
26,67	390,7300	0,103	9834,700	12,698
28,33	430,5600	0,095	10449,369	14,335
30,00	470,3800	0,087	11064,038	16,071
31,67	510,2000	0,080	11678,707	17,907
33,33	550,0200	0,074	12293,375	19,841

**Taula AIV.5.14:** Número de potència  $N_p$ , número de Reynolds  $Re$ , número de Froude  $Fr$ , per una concentració de glicerina del 80%;  $\rho = 1209,42 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0,034 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

n (rev/s)	Pn (w)	$N_p$	Re	Fr
3,33	8,5000	1,156	3631,000	0,198
4,17	10,6250	0,740	4539,000	0,310
5,00	12,7500	0,514	5447,000	0,446
5,83	14,8750	0,378	6355,000	0,608
6,67	17,0000	0,289	7262,000	0,794
8,33	30,8400	0,268	9077,000	1,240
10,00	47,6700	0,240	10893,000	1,786
11,67	62,9600	0,200	12708,000	2,431
13,33	98,7900	0,210	14522,000	3,175
15,00	110,3600	0,165	16335,000	4,018
16,67	133,7600	0,146	18150,000	4,960
18,33	173,9500	0,142	19965,000	6,002
20,00	192,7600	0,121	21780,000	7,143
21,67	230,1000	0,114	23595,000	8,383
23,33	300,4300	0,119	25410,000	9,722
25,00	316,0700	0,102	27225,000	11,161
26,67	352,0200	0,094	29040,000	12,698
28,33	387,9700	0,086	30855,000	14,335
30,00	423,9200	0,079	32670,000	16,071
31,67	459,8700	0,073	34485,000	17,907
33,33	495,8200	0,067	36300,000	19,841

## 4.6. Factor de cisallament

L'objectiu de la modelització del púlper té com a finalitat poder quantificar d'una forma global les forces implicades en el procés de desfibratge. D'aquesta manera s'espera poder correlacionar el comportament de les suspensions dels diferents paperots en quan als temps de desintegració  $t_D$ , consum específic d'energia **SEC**, consum de potència o potència instal·lada **P<sub>b</sub>**, amb els factors de cisallament obtinguts  $\lambda$ .

Així mateix, de l'expressió del factor de cisallament se'n pot derivar una equació que permet calcular l'energia neta i l'energia total consumida o dissipada al púlper. Aquesta energia hauria de coincidir sensiblement amb l'obtinguda a partir de les mesures directes efectuades en l'experiència real en el púlper.

### 4.6.1. Determinació del factor de cisallament

A partir de la resolució del model plantejat a l'apartat 4.5 (Mutjé et al., 2001 i 2003), a on es tracta la reologia del púlper, s'obté l'equació que segueix:

$$N_p = 7,76 \cdot Re^{-0,232} \cdot Fr^{-0,59} \quad (\text{eq. 4.6.1})$$

L'expressió del factor de cisallament s'obté, prèvia substitució de **N<sub>p</sub>**, **Re** i **Fr** i, assimilació de  $\mu$  a  $\lambda$ , tal com es mostra a continuació:

$$\lambda = 6,08 \cdot 10^6 \cdot Pn^{4,31} \cdot \rho^{-3,31} \cdot n^{-6,78}, \quad [n = 18,33 \sim 33,33 \text{ rev/s}] \quad (\text{eq. 4.6.2})$$

Com es pot observar, per calcular el factor de cisallament cal conèixer el valor de la potència neta **P<sub>n</sub>** (W), el pes específic  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) i la velocitat d'agitació del púlper **n** (rev/s).

La taula IV.6.1 recull el valor de la potència bruta (les mesures de potència bruta pels diferents paperots a 19 i 26 rev/s es troben tabulats a l'annex A4.6.1), la taula IV.6.2

mostra el valor de les potències corregides o netes tinguent en compte que la potència al buit a 19 rev/s val 395 W i a 26 rev/s val 508 W. Per últim, la taula IV.6.3 mostra el valor del pes específic per les diferents fraccions massiques i velocitats de cadascun dels papers estudiats.

Taula IV.6.1: Potències brutes (W) en el pulpejat per diferents papers i diferents fraccions massiques.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	$X_m$						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	699,0	804,9	989,9	1034,2	1082,8	1327,3	1432,1
	26 rev/s	945,9	1052,4	1159,4	1326,4	1494,0	1656,1	1819,3
PF	19 rev/s	722,8	975,8	1225,4	1335,0	1433,2	-	-
	26 rev/s	1066,5	1569,8	1884,1	1964,3	2019,6	-	-
PR	19 rev/s	761,5	858,9	1105,4	1231,1	1470,6	-	-
	26 rev/s	1008,9	1195,3	1507,9	1626,4	1873,0	-	-

Les potències consumides, tant la bruta  $P_b$  com la neta  $P_n$ , tenen una evolució pràcticament lineal amb la fracció massica o consistència.

Taula IV.6.2: Potències netes (W) en el pulpejat per diferents papers i diferents fraccions massiques.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	$X_m$						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	304,0	409,9	594,9	639,2	687,8	932,3	1037,1
	26 rev/s	437,9	544,4	651,4	818,4	986,0	1148,1	1311,3
PF	19 rev/s	327,8	580,8	830,4	940,0	1038,2	-	-
	26 rev/s	558,5	1061,8	1376,1	1456,3	1511,6	-	-
PR	19 rev/s	366,5	463,9	710,4	836,1	1075,6	-	-
	26 rev/s	500,9	687,3	999,9	1118,4	1365,0	-	-

Així mateix el pes específic de la suspensió que varia en funció de la consistència però també amb el contingut de càrregues, presenta una evolució també lineal amb les respectives consistències i tipus de paper.

Taula IV.6.3: Pes específic ( $\text{kg/m}^3$ ) en el pulpejat per diferents papers i diferents fraccions màssiques.

Paper	$X_m$						
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	1028,0	1037,6	1047,5	1057,5	1067,7	1078,2	1088,8
PF	1023,9	1032,2	1040,5	1049,0	1057,7	-	-
PR	1026,5	1035,7	1045,5	1054,5	1064,2	-	-

Per tant, d'acord amb l'equació, el factor de cisallament per les suspensions cel·lulòsiques estudiades és el que es mostra a la taula IV.6.4 que es mostra tot seguit.

Taula IV.6.4: Factor de cisallament (Pa·s) en el pulpejat per diferents papers i diferents fraccions màssiques.

Paper	$\omega_{\text{ROTOR}}$	$X_m$						
		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
PQ	19 rev/s	0,060	0,232	1,116	1,472	1,953	6,995	10,705
	26 rev/s	0,038	0,094	0,196	0,508	1,096	2,042	3,501
PF	19 rev/s	0,098	1,044	4,717	7,800	11,602	-	-
	26 rev/s	0,108	1,667	4,934	6,110	6,959	-	-
PR	19 rev/s	0,117	0,402	2,445	4,795	13,789	-	-
	26 rev/s	0,068	0,260	1,268	1,998	4,580	-	-

Com es pot observar, el factor de cisallament augmenta amb la fracció màssica de la suspensió. Respecte a la influència de la velocitat d'agitació sobre el factor de cisallament, s'observa que al treballar més lentament (19 rev/s) s'obtenen uns factors

de cisallament majors. També es constata que el paper amb un major valor de  $\lambda$  és el paper fotocopia PF, seguit pel paper revista PR i per últim, el paper estucat de qualitat PQ. Per tant, la relació que segueixen els factors de cisallament és la que es mostra a continuació:

$$\lambda_{PF} > \lambda_{PR} > \lambda_{PQ}$$

La representació gràfica del factor de cisallament amb la fracció màssica mostra que aquest paràmetre segueix una tendència potencial creixent (Figures 4.6.1 i 4.6.2). Les corbes d'ajust són les que es representen a la taula IV.6.5.

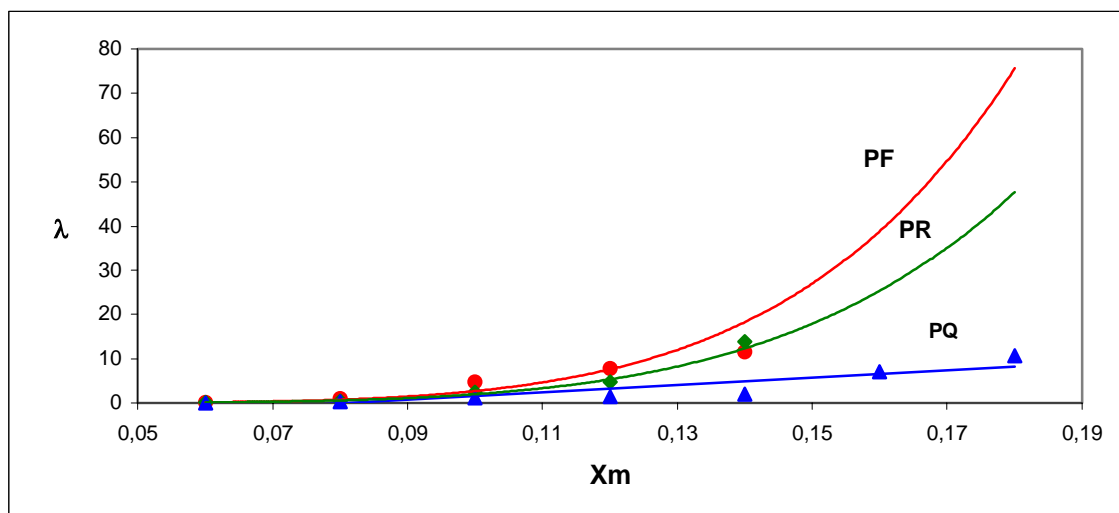


Figura 4.6.1: Factor de cisallament  $\lambda$  (Pa·s) per PQ, PR i PF a 19 rev/s.

Es pot observar al comparar l'evolució del factor de cisallament a 19 i 26 rev/s que així com per PF es tenen els factors de cisallament més elevats i això es correspon amb el  $t_D$  més petits per PQ i PR no succeeix així. Idèntic comportament s'observa amb el consum específic d'energia. En canvi si que s'observa una proporcionalitat directa amb la potència consumida.

També es constata que els valors absoluts de  $\lambda$  estan fortament influenciats per la velocitat del rotor, essent més baixos quan les velocitats d'agitació són més elevades.

En termes reològics diríem que la velocitat del reòmetre, que en aquest cas és el púlper influeix sobre la magnitud del factor de cisallament.

Evidentment els valors del factor de cisallament conserven en funció de la fracció massica una proporcionalitat entre ells.

Un altre aspecte és el fet que d'una manera general, es pot afirmar que el temps de desintegració disminueix en augmentar la velocitat del rotor i també el factor de cisallament. Per tant, factor de cisallament i temps de desintegració no estarien en concordància al comparar dues velocitats d'agitació, en canvi sí, en la seva evolució amb la consistència per una mateixa velocitat d'agitació. Per tant, en termes absoluts cal tenir una certa precaució al valorar el factor de cisallament. No obstant, els seus valors es mouen dintre un ordre de magnitud similar a l'estimat per Bennington i Kerekes (1996) per suspensions fibroses.

A nivell industrial, la velocitat del rotor del púlper sempre és constant i per tant les condicions reomètriques també. Aquest sí que permet comparar suspensions, com veurem més endavant.

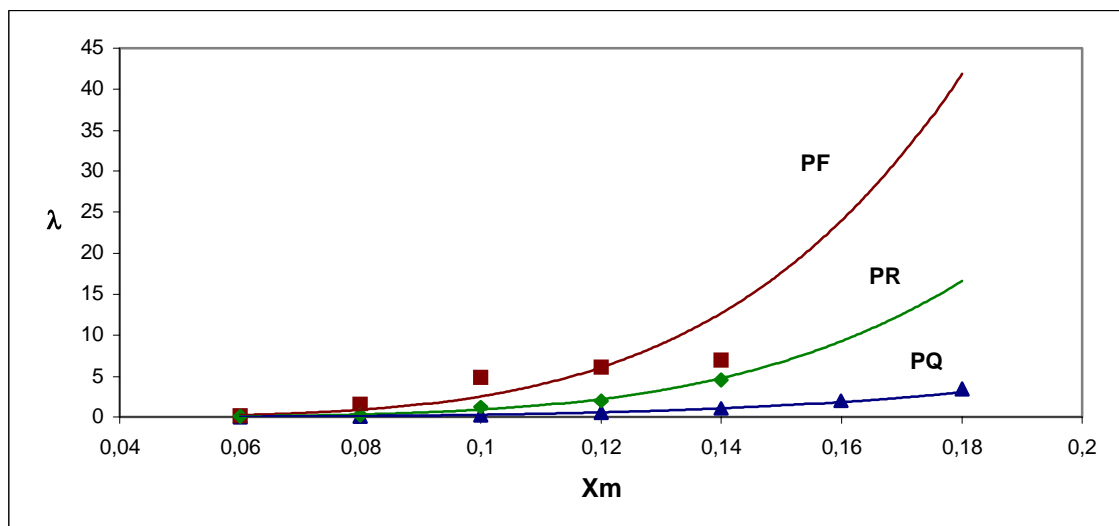


Figura 4.6.2: Factor de cisallament  $\lambda$  (Pa·s) per PQ, PR i PF a 26 rev/s.



La taula IV.6.5 recull totes les equacions de regressió utilitzades per ajustar les diferents corbes que representen el factor de cisallament durant el desfibratge dels diferents papers estudiats.

**Taula IV.6.5:** Equacions de les corbes d'ajust de  $\lambda$  en funció de  $X_m$

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$\lambda = 21 \cdot 10^3 \cdot X_m^{4,4725}$	0,9730
	PF	$\lambda = 1230 \cdot 10^3 \cdot X_m^{5,6600}$	0,9480
	PR	$\lambda = 495 \cdot 10^3 \cdot X_m^{5,3913}$	0,9794
26 rev/s	PQ	$\lambda = 4256,8 \cdot X_m^{4,2145}$	0,9898
	PF	$\lambda = 143 \cdot 10^3 \cdot X_m^{4,7428}$	0,8614
	PR	$\lambda = 78763 \cdot X_m^{4,9356}$	0,9866

Si el factor de cisallament de la taula IV.6.4 s'expressa en funció de la consistència, s'observa que les equacions obtingudes (taula IV.6.6) són properes a la proposada per Bennington i Kerekes per expressar la viscositat aparent en funció de la consistència.

L'equació 4.6.3 expressa aquesta variable, encara que amb constants sensiblement diferents, condueixen a valors de  $\lambda$  del mateix ordre.

$$\mu_a = 1.5 \times 10^{-3} \cdot C^{3.1} \quad (\text{eq. 4.6.3})$$

**Taula IV.6.6:** Equacions que relacionen el factor de cisallament  $\lambda$  amb la consistència de la pasta C%.

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$\lambda = 2 \cdot 10^{-5} \cdot C^{4,4725}$	0,9730
	PF	$\lambda = 6 \cdot 10^{-5} \cdot C^{5,657}$	0,9483
	PR	$\lambda = 8 \cdot 10^{-6} \cdot C^{5,3913}$	0,9794
26 rev/s	PQ	$\lambda = 2 \cdot 10^{-5} \cdot C^{4,2145}$	0,9898
	PF	$\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \cdot C^{4,7429}$	0,8614
	PR	$\lambda = 1 \cdot 10^{-5} \cdot C^{4,9356}$	0,9866

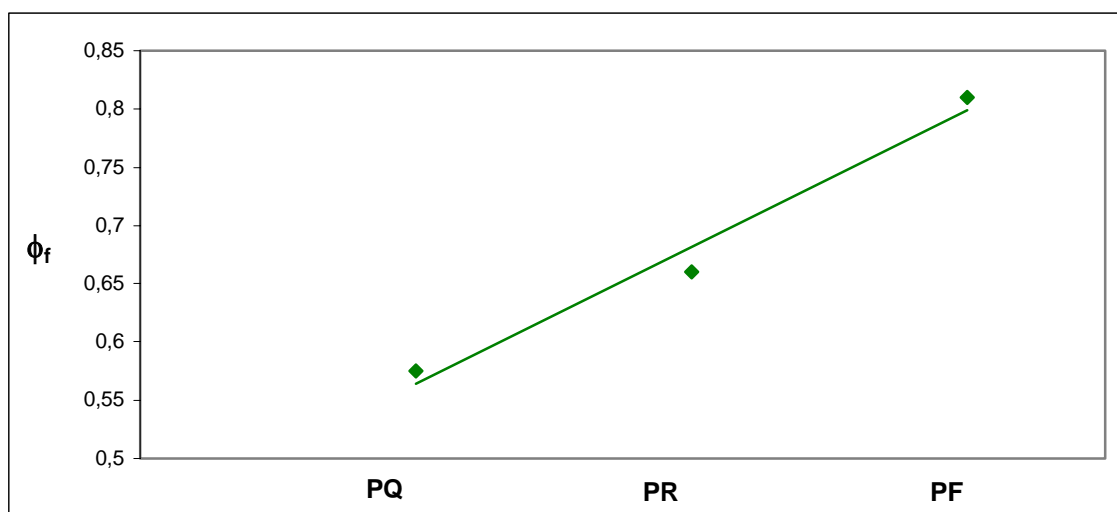
Els valors de  $\lambda$  per a cada tipus de suspensió i velocitat del rotor són valors del mateix ordre que els obtinguts per Bennington i Kerekes que també van ésser obtinguts per una determinada velocitat del desintegrador reòmetre.

Prèviament s'ha indicat que l'evolució de  $\lambda$  en funció del tipus de paper marcava una tendència general en què els factors de cisallament de PF eren superiors als de PR i aquests a PQ. A la taula IV.6.7 es mostra la fracció de cel·lulosa  $\phi_f$  i de càrrega  $\phi_c$  que conté cadascun dels papers.

**Taula IV. 6.7:** Fracció cel·lulosa  $\phi_f$  i mineral  $\phi_c$  dels paperots.

Paper	$\phi_f$	$\phi_c$
PQ	0,575	0,425
PR	0,660	0,340
PF	0,810	0,190

Tal com mostra la gràfica de la figura 4.6.3 el contingut en fibra  $\phi_f$  segueix una evolució creixent del tipus lineal.



**Figura 4.6.3:** Evolució del contingut en fibra  $\phi_f$  per a diferents papers.

Cal recordar però que el contingut de càrrega  $\phi_c$  arriba a la suspensió des del paper de diferents maneres. En el cas de PQ principalment de la capa d'estucat, i en el cas de PR i PF de la massa. Ara un cop arribem a la fluidització, fenomen que té lloc en els primers moments, generalment per sota del mig minut, si el púlper està ben programat des del punt de vista de consistència i velocitat del rotor, com es pot observar en comparar el contingut de fibra i el factor de cisallament, l'evolució d'aquest és proporcional al contingut de cel·lulosa.

Aquesta qüestió té una certa lògica, doncs des d'un punt de vista de desenvolupament d'interaccions, interpartícules en el si de la suspensió les càrregues apareixen com més inerts, respecte a les fibres de cel·lulosa. A la gràfica de la figura 4.6.4 s'ha representat gràficament l'evolució del factor de cisallament en funció del contingut de fibres i la fracció massica del paper.

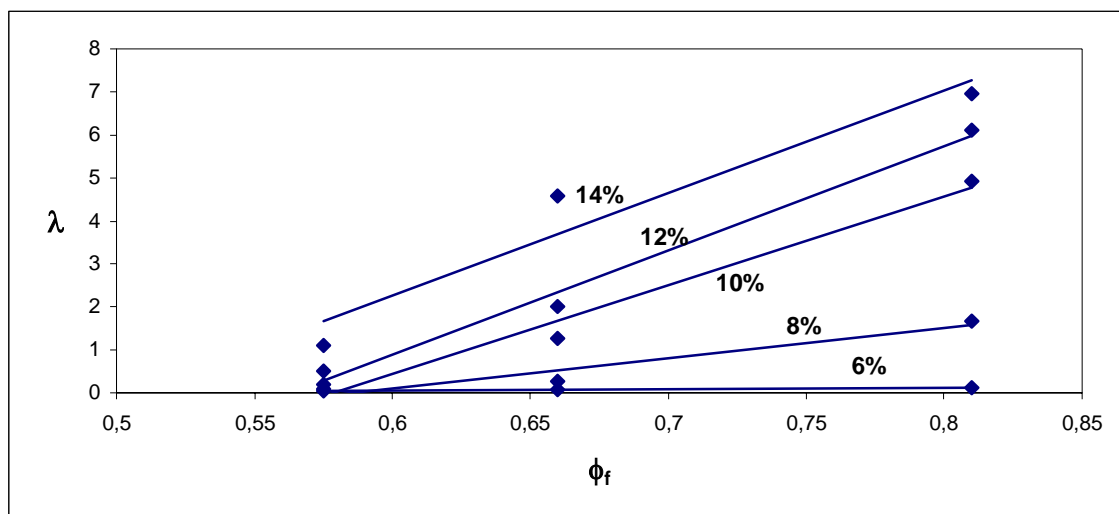


Figura 4.6.4: Evolució del factor de cisallament per a cada consistència i tipus de paperot.

Es pot observar que el factor de cisallament  $\lambda$  varia molt poc en augmentar la fracció de fibra  $\phi_f$  quan les consistències o fraccions massiques són baixes (6~8%) però augmenta molt quan les consistències són superiors (10~14%). L'evolució a 19 rev/s aquesta no és tan clara com la de 26 rev/s que s'acaba de presentar.

L'objectiu de la modelització del púlper és verificar el comportament de la desintegració o desfibratge en quan al comportament energètic i temps de

desintegració, però també es compararà amb la viscositat aparent  $\mu_a$  estimada per Bennington i Kerekes (1996).

A continuació es representa la relació del factor de cisallament amb aquests paràmetres característics tractats durant tota la discussió de resultats. En concret, es representa la relació  $\lambda$ - $t_D$ ,  $\lambda$ -**SEC** i  $\lambda$ -  $\mu_a$ , a les gràfiques que van des de la figura 4.6.5 fins a la 4.6.9. Per començar, la relació factor de cisallament amb el temps de desintegració mostrada a les gràfiques de les figures 4.6.5 i 4.6.6, indica que a mesura que augmenta  $\lambda$  es redueix de manera potencial el temps de desintegració pels tres papers estudiats. La taula IV.6.8 mostra les equacions d'ajust obtingudes.

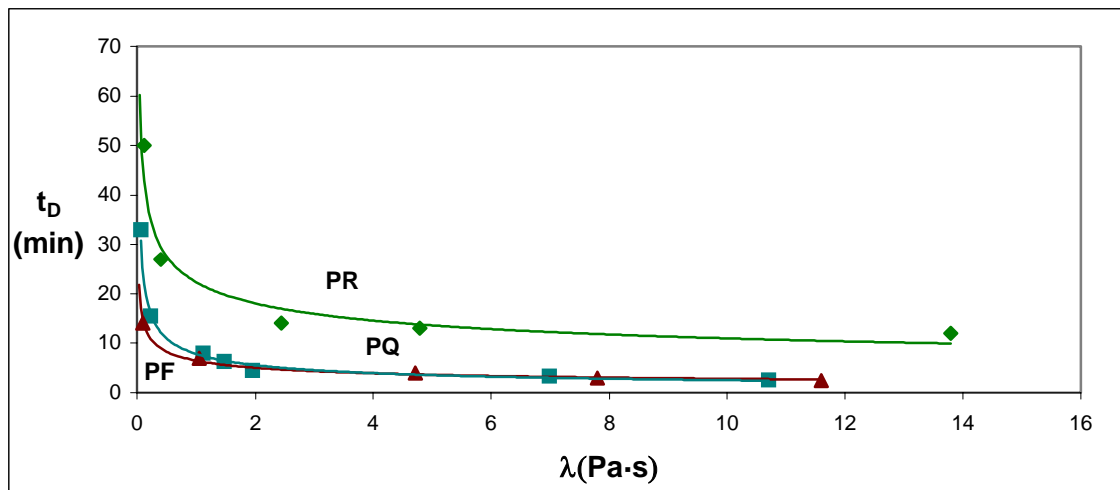


Figura 4.6.5:  $t_D$ (min) en funció de  $\lambda$  (Pa.s) per PQ, PR i PF a 19 rev/s.

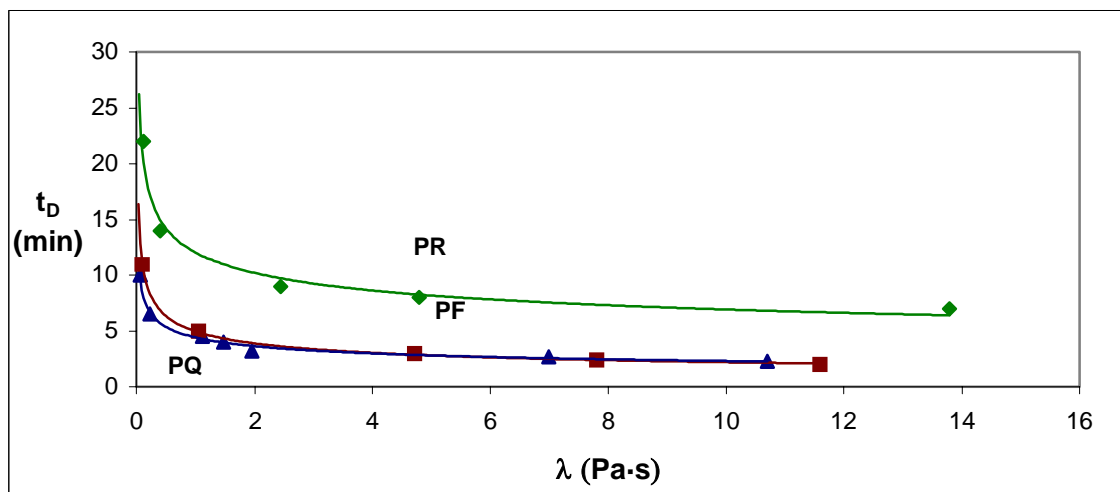


Figura 4.6.6:  $t_D$ (min) en funció de  $\lambda$  (Pa.s) per PQ, PR i PF a 26 rev/s

Referent a la relació entre el factor de cisallament i el consum específic d'energia (figures 4.6.7 i 4.6.8) , es pot observar que l'evolució que segueix el **SEC** amb  $\lambda$  és similar a la que presentava el temps de desintegració en front el factor de cisallament. És a dir, el consum específic d'energia es redueix de manera potencial amb el factor de cisallament. Aquesta reducció comporta que per  $\lambda$  elevats el **SEC** és molt baix.

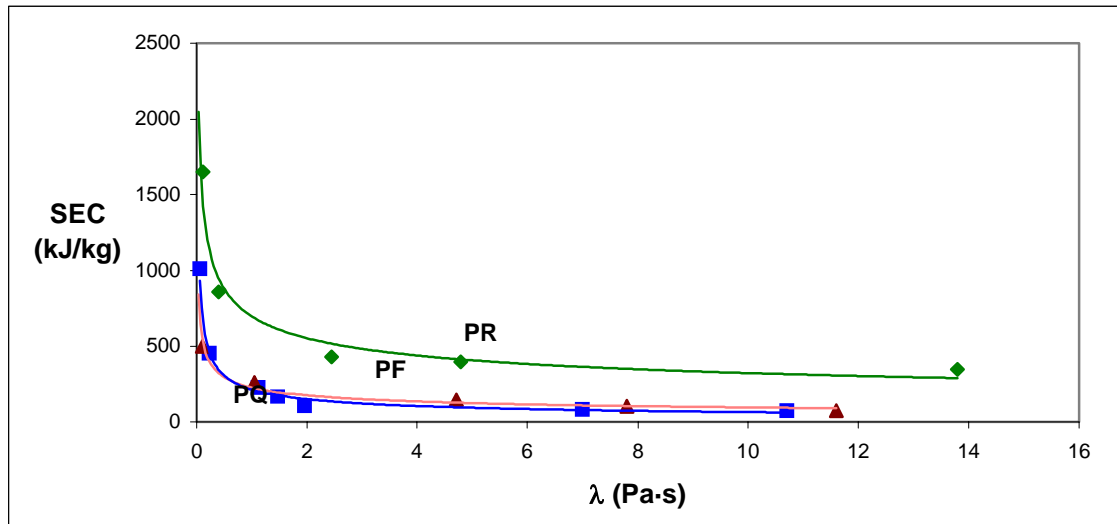


Figura 4.6.7: SEC en funció de  $\lambda$  per PQ, PR i PF a 19 rev/s.

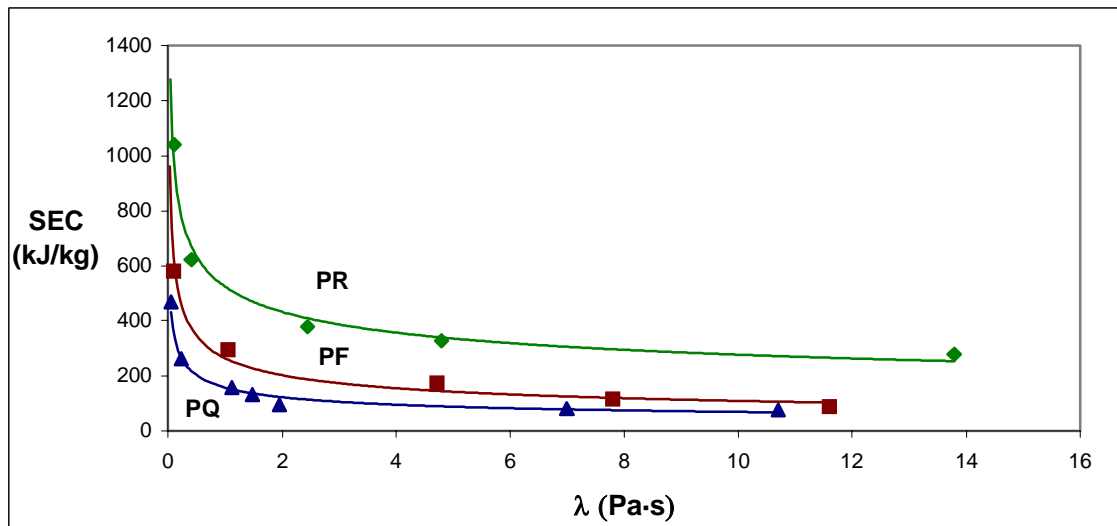


Figura 4.6.8: SEC (kJ/kg) en funció de  $\lambda$  (Pa·s) per PQ, PR i PF a 26 rev/s.

En darrer lloc, es presenta la relació de la viscositat aparent  $\mu_a$  amb el factor de cisallament  $\lambda$ . Aquesta relació és la mostrada a la gràfica de la figura 4.6.9. Com es

pot veure, es tracta d'una relació lineal de manera que a mesura que augmenta el factor de cisallament també ho fa la viscositat aparent.

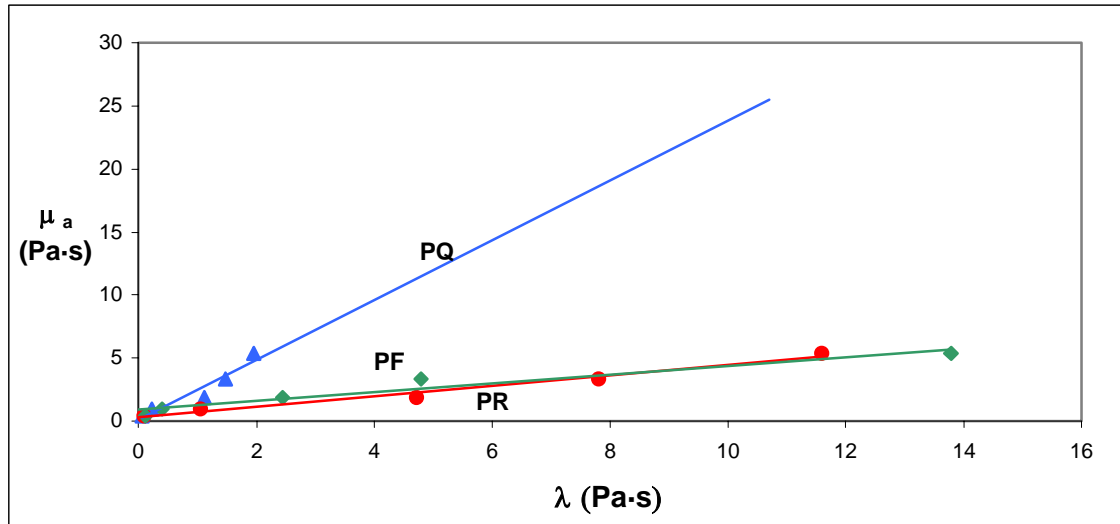


Figura 4.6.9: Viscositat aparent  $\mu_a$  en funció del factor de cisallament  $\lambda$  per PQ, PR i PF.

Les equacions que resumeixen aquestes tendències són les que es mostren a la taula IV.6.8. Com es pot observar, tant la relació  $t_D$ - $\lambda$ , com la relació SEC- $\lambda$  són del tipus potencial, mentre que  $\mu_a$ - $\lambda$  és lineal.

Taula IV.6.8: Equacions de les corbes d'ajust de  $t_D$ , SEC i  $\mu_a$  en funció de  $\lambda$

Correlació	Tipus	Equació	$r^2$
$t_D$ - $\lambda$	PQ	$t_D = 6,4704 \cdot \lambda^{-0,3575}$	0,9875
	PF	$t_D = 7,8229 \cdot \lambda^{-0,4880}$	0,9847
	PR	$t_D = 22,2910 \cdot \lambda^{-0,3078}$	0,9305
SEC- $\lambda$	PQ	$SEC = 215,31 \cdot \lambda^{-0,5216}$	0,9660
	PF	$SEC = 228,90 \cdot \lambda^{-0,3816}$	0,9630
	PR	$SEC = 698,60 \cdot \lambda^{-0,3319}$	0,9434
$\mu_a$ - $\lambda$	PQ	$\mu_a = 2,3718 \cdot \lambda^{0,0896}$	0,9181
	PF	$\mu_a = 0,3445 \cdot \lambda^{0,8975}$	0,9371
	PR	$\mu_a = 0,4152 \cdot \lambda^{0,2842}$	0,9819

**4.6.2. Determinació de l'energia dissipada a la suspensió**

Si es té en compte l'expressió del factor de cisallament ( Eq. 4.6.2) es pot aïllar la potència neta consumida per les suspensions en funció del pes específic, el propi factor de cisallament i la velocitat del rotor, de forma que l'expressió anterior queda modificada de la següent manera:

$$P_n = 2,66 \cdot 10^{-2} \cdot \rho^{0,768} \cdot n^{1,57} \cdot \lambda^{0,23} \tag{eq. 4.6.4}$$

Com que **P<sub>n</sub>** és la potència neta mitjana consumida per la suspensió i per altra banda coneixem el temps de desintegració necessaris per assolir un índex de Sommerville del 0,01%, això permet el càlcul de les energies netes dissipades a la suspensió, que en l'apartat 4.3 s'han anomenat energia transmesa o dissipada a la suspensió **E<sub>TS</sub>**.

Si el model obtingut reflexa el comportament del púlper i les forces de cisallament que tenen lloc en el transcurs de la desintegració, unes i altres energies calculades i obtingudes per camins ben diferents haurien de coincidir sensiblement. L'expressió que permet calcular l'energia a partir del factor de cisallament és la que segueix:

$$E_n = P_n \cdot t_D = 2,66 \cdot 10^{-2} \cdot \rho^{0,768} \cdot n^{1,57} \cdot \lambda^{0,23} \cdot t_D \tag{eq. 4.6.5}$$

A la taula IV.6.9 es reflexen les energies calculades segons l'equació a 19 i 26 rev/s pels diferents papers.

**Taula IV.6.9:** Potències netes (W) en el pulpejat per diferents papers i diferents consistències.

		<b>X<sub>m</sub></b>						
<b>Paper</b>	<b>ω<sub>ROTOR</sub></b>	<b>0,06</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,12</b>	<b>0,14</b>	<b>0,16</b>	<b>0,18</b>
<b>PQ</b>	<b>19 rev/s</b>	598	372	278	235	180	178	156
	<b>26 rev/s</b>	257	207	171	191	183	180	175
<b>PF</b>	<b>19 rev/s</b>	273	236	192	163	150	-	-
	<b>26 rev/s</b>	366	308	238	202	174	-	-
<b>PR</b>	<b>19 rev/s</b>	1091	735	581	635	752	-	-
	<b>26 rev/s</b>	658	564	526	522	55	-	-

Si aquestes energies es comparen amb les mesures a l'apartat 4.3, d'una forma global s'obté la gràfica de la figura 4.6.10. Com es pot observar, hi ha una bona correlació entre les energies mesurades i les calculades ( $r=0,9555$ ).

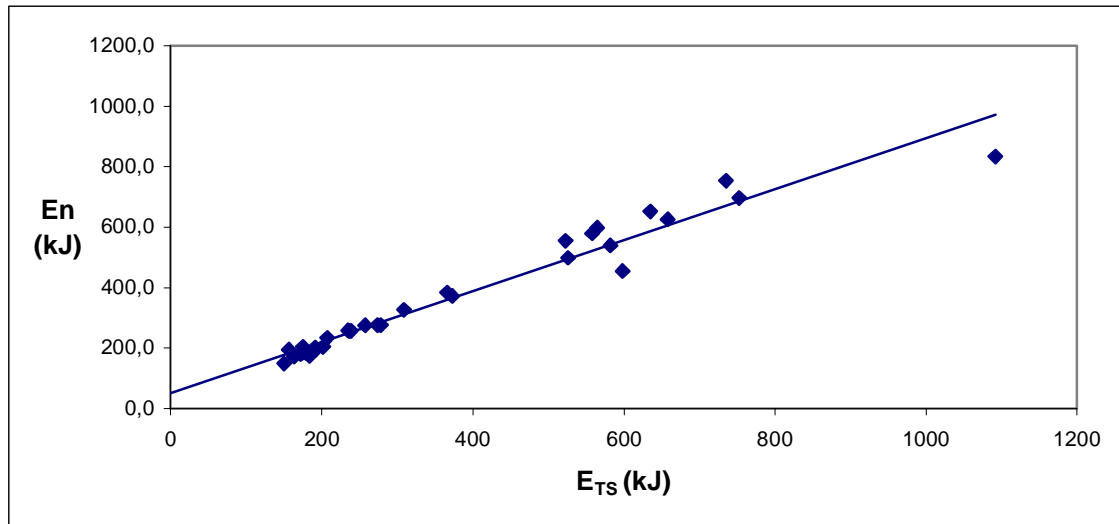


Figura 4.6.10: Correlació entre  $E_n$  (kJ) i  $E_{TS}$  (kJ).

Ara bé, aquesta bona correlació que s'observa en l'anàlisi global no és tan bona quan es compara paper a paper en cadascuna de les condicions de velocitat del rotor, com es mostra a la taula IV.6.10.

Taula IV.6.10: Equacions que relacionen l'energia neta  $E_n$  amb l'energia dissipada a la suspensió  $E_{TS}$ .

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$E_n = 1,4743 \cdot E_{TS} - 120,92$	0,9490
	PF	$E_n = 0,9409 \cdot E_{TS} + 5,6093$	0,9816
	PR	$E_n = 1,5935 \cdot E_{TS} - 348,7$	0,7825
26 rev/s	PQ	$E_n = 0,2548 \cdot E_{TS} + 125,11$	0,7785
	PF	$E_n = 1,4306 \cdot E_{TS} - 42,694$	0,9827
	PR	$E_n = 0,4249 \cdot E_{TS} + 270,4$	0,7337
General		$E_n = 0,8437 \cdot E_{TS} + 51,477$	0,9555



El fet que l'energia dissipada a la suspensió  $E_{TS}$  i la calculada a partir de  $\lambda$ ,  $E_n$  tinguin correlacions acceptables, també valida el model reològic del púlper.

Finalment es creu interessant veure l'evolució del factor de cisallament amb la potència neta consumida per la suspensió. A les gràfiques de les figures 4.6.11 i 4.6.12 es constata que la potència neta evoluciona linealment amb el factor de cisallament.

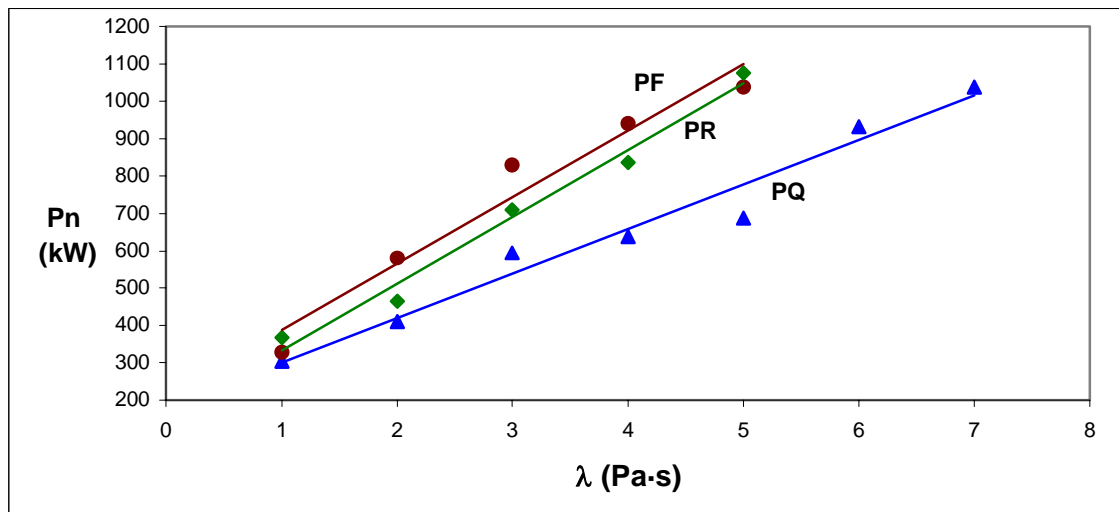


Figura 4.6.11: Potència neta  $P_n$  en funció de  $\lambda$  per PQ, PR i PF a 19 rev/s.

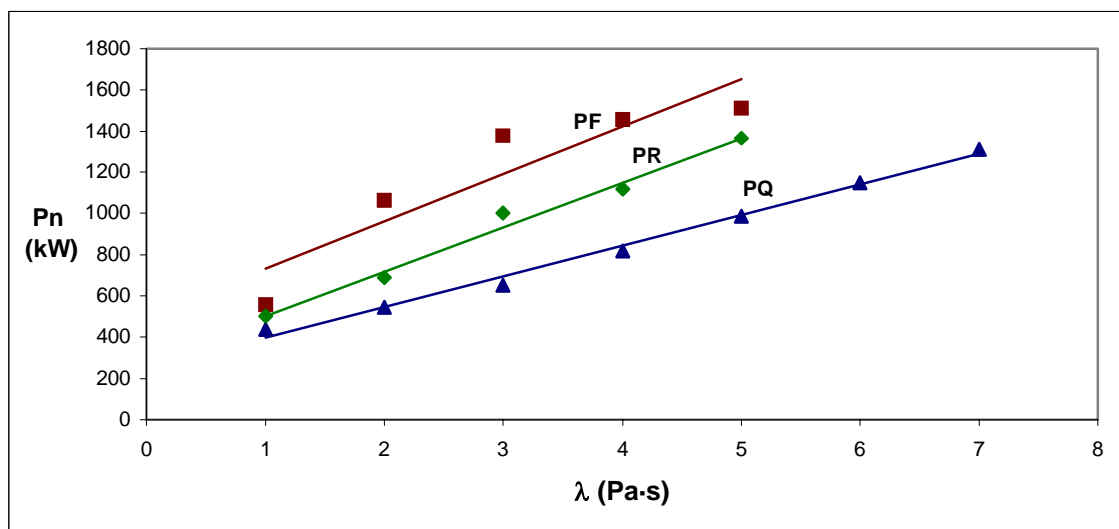


Figura 4.6.12: Potència neta  $P_n$  en funció de  $\lambda$  per PQ, PR i PF a 26 rev/s.

La taula IV.6.11 recull totes aquestes equacions de regressió. Com es pot observar, son rectes amb una bona correlació. Per tant, es pot dir que la potència neta consumida pel púlp per augmenta linealment amb el factor de cisallament. Aquest fet és interessant des d'un punt de vista industrial donat que pot donar una idea bastant exacta de l'evolució del factor de cisallament de la suspensió desintegrada i així poder establir un barem intern per un determinat nivell de desintegració

**Taula IV.6.11:** Equacions que relacionen la potència neta  $P_n$  amb el factor de cisallament  $\lambda$ .

$\omega$ ROTOR	Tipus	Equació	$r^2$
19 rev/s	PQ	$P_n = 119,18 \cdot \lambda + 181,17$	0,9675
	PF	$P_n = 178 \cdot \lambda + 209,43$	0,9535
	PR	$P_n = 179,05 \cdot \lambda + 153,34$	0,9826
26 rev/s	PQ	$P_n = 148,65 \cdot \lambda + 297,91$	0,9924
	PF	$P_n = 230,08 \cdot \lambda + 502,62$	0,8481
	PR	$P_n = 215,93 \cdot \lambda + 286,49$	0,9867



## **ANNEX 4.6.1.**

***Potències brutes consumides per les  
suspensions***



Taula AIV.6.1: Potència (W) consumida per les suspensions de paper PQ a 19 rev/s.

Temps (min)	$X_m$						
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
1,5	922	924	935	1090	1248	1395	1446
2,5	797	870	966	1058	1155	1347	1438
3,5	743	844	979	1045	1116	1331	1435
4,5	714	828	986	1038	1094	1321	1433
5,5	695	816	991	1033	1080	1318	1434
6,5	682	805	994	1030	1070	1314	1431
7,5	672	797	997	1028	1063	1312	1430
8,5	665	790	998	1025	1057	1311	1430
9,5	659	781	1000	1024	1053	1314	1429
10,5	654	775	1001	1024	1050	1317	1429
11,5	650	769	1002	1022	1047	1320	1429
12,5	647	762	1003	1022	1044	1323	1429
13,5	644	756	1003	1020	1042	1328	1428
14,5	642	751	1004	1020	1040	1331	1428
<b>Potència mitjana</b>	<b>699</b>	<b>804</b>	<b>989</b>	<b>1034</b>	<b>1082</b>	<b>1327</b>	<b>1432</b>

Taula AIV.6.2: Potència (W) consumida per les suspensions de paper PQ a 26 rev/s.

Temps (min)	$X_m$						
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
1,5	991	1123	1258	1345	1434	1715	1994
2,5	966	1084	1203	1335	1468	1680	1896
3,5	955	1066	1179	1332	1482	1665	1854
4,5	949	1057	1166	1329	1490	1660	1831
5,5	945	1050	1156	1325	1495	1655	1816
6,5	942	1048	1152	1325	1499	1652	1806
7,5	940	1045	1148	1324	1501	1649	1798
8,5	939	1041	1144	1323	1503	1647	1792
9,5	938	1040	1142	1323	1505	1646	1788
10,5	937	1038	1139	1322	1506	1645	1784
11,5	936	1037	1138	1322	1507	1644	1781
12,5	935	1036	1137	1322	1508	1643	1779
13,5	935	1035	1135	1322	1509	1642	1776
14,5	934	1034	1134	1321	1509	1642	1775
<b>Potència mitjana</b>	<b>945</b>	<b>1052</b>	<b>1159</b>	<b>1326</b>	<b>1494</b>	<b>1656</b>	<b>1819</b>

Taula AIV.6.3: Potència (W) consumida per les suspensions de paper PR a 19 rev/s.

Temps (min)	$X_m$				
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
1,5	1078	1194	1416	1635	1983
2,5	900	1017	1242	1405	1696
3,5	824	937	1167	1316	1573
4,5	782	893	1126	1258	1504
5,5	756	864	1099	1225	1461
6,5	737	839	1081	1200	1431
7,5	723	825	1068	1181	1409
8,5	713	813	1058	1168	1392
9,5	705	800	1049	1159	1378
10,5	698	790	1043	1151	1368
11,5	692	775	1038	1139	1359
12,5	688	770	1033	1137	1351
13,5	684	757	1029	1132	1345
14,5	681	750	1026	1129	1339
<b>Potència mitjana</b>	<b>761</b>	<b>858</b>	<b>1105</b>	<b>1231</b>	<b>1470</b>



Taula AIV.6.4: Potència (W) consumida per les suspensions de paper PR a 26 rev/s.

Temps (min)	$X_m$				
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
1,5	1218	1581	1876	1913	1927
2,5	1101	1335	1670	1736	1897
3,5	1050	1261	1581	1679	1884
4,5	1023	1221	1532	1651	1877
5,5	1005	1193	1501	1629	1872
6,5	993	1171	1479	1615	1869
7,5	984	1157	1463	1601	1866
8,5	977	1149	1451	1591	1865
9,5	971	1133	1442	1582	1863
10,5	967	1125	1434	1571	1862
11,5	963	1116	1428	1562	1861
12,5	960	1107	1422	1555	1860
13,5	958	1096	1417	1545	1860
14,5	955	1089	1414	1540	1859
<b>Potència mitjana</b>	<b>1008</b>	<b>1195</b>	<b>1507</b>	<b>1626</b>	<b>1873</b>

Taula AIV.6.5: Potència (W) consumida per les suspensions de paper PF a 19 rev/s.

Temps (min)	$X_m$				
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
1,5	698	953	1207	1311	1386
2,5	712	966	1217	1316	1412
3,5	718	972	1222	1325	1424
4,5	721	974	1224	1329	1430
5,5	723	976	1226	1332	1434
6,5	725	978	1227	1334	1437
7,5	726	979	1228	1335	1439
8,5	727	979	1228	1336	1440
9,5	727	980	1229	1337	1442
10,5	728	980	1229	1380	1443
11,5	728	980	1229	1338	1444
12,5	728	981	1230	1339	1444
13,5	729	981	1230	1339	1445
14,5	729	982	1230	1339	1445
<b>Potència mitjana</b>	<b>722</b>	<b>975</b>	<b>1225</b>	<b>1335</b>	<b>1433</b>

Taula AIV.6.6: Potència (W) consumida per les suspensions de paper PF a 26 rev/s.

Temps (min)	$X_m$				
	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
1,5	1029	1598	1974	1982	1940
2,5	1050	1584	1924	1959	1985
3,5	1059	1578	1902	1958	2004
4,5	1064	1571	1890	1957	2014
5,5	1067	1568	1882	1956	2021
6,5	1070	1566	1877	1956	2026
7,5	1071	1566	1873	1957	2029
8,5	1072	1565	1870	1956	2032
9,5	1073	1564	1868	1956	2034
10,5	1074	1564	1866	1956	2036
11,5	1075	1564	1865	1972	2037
12,5	1075	1563	1863	1980	2038
13,5	1076	1563	1862	1975	2039
14,5	1076	1563	1861	1980	2040
<b>Potència mitjana</b>	<b>1066</b>	<b>1569</b>	<b>1884</b>	<b>1964</b>	<b>2019</b>

## 4.7. BIBLIOGRAFIA

**Cherbit, M, Roux, J.C.(2004):** *Revue ATIP* 58 (2).

**Brouillette F., Daneault C., Dorris G. (2000):** *Conférence Technologique Estivale*, Québec, 7-9 June. 87-92.

**Paraskevas S. (1983):** *TAPPI Pulping Conference* vol.I, Houston, 24-26 October 1983, p. 129-132.

**Holik, H., (1988):** *TAPPI Engineering Conference*, Chicago, 19-22 September, 1988, p. 59-64.

**Bennington C.P.J. (1998a):** *Paper Recycling challenge vol. 3: Process Technology 1998*, Chapter 19, Doshi M.R. & Dyers J.M. Editors, Appleton, 268-282.

**Fabry, B., (1999):** Tesi Doctoral. Institut National Polytechnique de Grenoble.

**Amaral M.E., Renaud M., Roux J-C. (2000):** *Revue ATIP* 54 (3-4) 76-84.

**Bennington C.P.J., Kerekes R.J. (1996):** *TAPPI Journal* vol. 79 n° 2, February 1996, p. 253-258.

**Gullichsen J., Härkönen E. (1981):** *TAPPI Journal* vol. 64 n° 6, June 1981, p. 69-72.

**Wahren D. (1979)(1980):** Conference Paper Science and Technology, Appleton, 8-10 Mai 1979 1980, p. 112-129.

**Metzner A.B., Otto R.E. (1957):** *Journal of American Industrial and Engineering Chemistry* vol. 43 n° 3, Mars 1957, p. 3 -10.

**Roustan M., Pharamond J.C, Line.A:** *Technique de l'Ingénieur, Traité-Génie des Procédés J2.II, Opérations Unitaires J3800.*

**Mutjé P., Presta S., Pèlach M.A, Vilaseca F., Roux, JC (2003):** *Chemical Industry and Environment IV*, 1, 415-424.

**Mutjé P., Lopez A., Puig J., Vilaseca F., Pèlach M.A (2001):** *Ingeniería Química* 115-119.

**Blanco M.A., Barbadillo P., Tijero J., Pérez M.J.; Rodríguez F. (1993):** *Cellulosa y Papel (Chile)* vol. 9 n° 3, August 1993, p. 30-34.



# **5. RESUM DEL TREBALL REALITZAT I CONCLUSIONS GENERALS**



## 5.1. Resum del treball realitzat

El paper és un producte natural, reciclable, fabricat a partir de matèria renovable, i té molts avantatges ambientals que fan preveure que el seu consum es mantindrà en el futur i probablement s'incrementarà.

En el capítol d'introducció d'aquesta tesi es fa un estudi de l'evolució de la producció de paper a Espanya i es compara amb alguns països significatius d'arreu. Així, també s'estudia l'evolució de la recollida selectiva de paper com a mesura de l'estat de conscienciació dels consumidors i índex predictiu pel futur. En aquest estudi sobre l'interès industrial i social del tema es recullen algunes dades i índexs de la indústria del reciclatge de paper.

El present treball aprofundeix en l'etapa de la desintegració del paper usat com a etapa important del procés. Donat que en la bibliografia actual, aquesta etapa ha estat una mica oblidada, tot i que no és una etapa crítica del procés, sí que té importants implicacions econòmiques.

Per això s'ha plantejat com a objectiu l'anàlisi dels aspectes més interessants de la desintegració, el temps necessari pel procés, els aspectes energètics i potència necessària, l'estudi des del punt de vista reològic de la desintegració, la caracterització del desintegrador amb l'ajut de l'anàlisi adimensional i la utilització del factor de cisallament com a paràmetre definatori del procés.

En el capítol de fonaments teòrics es detalla l'estat actual de coneixement, aprofundint en diversos apartats que són la desintegració, els aspectes reològics, la fluidització de la suspensió paperera i la caracterització reològica del sistema de fluidització.

En l'apartat de desintegració s'estudia el procés del desfibratge del paperot. Les forces que intervenen en la desintegració tenen diferents mecanismes d'actuació que varien en funció de l'aparellatge utilitzat, del tipus de paperot, de la consistència o fracció màssica i dels paràmetres de desintegració químics i tèrmics.



Cada tipus de força és difícil de quantificar individualment, però alguns autors han fet aproximacions qualitatives. Les principals forces implicades es divideixen en forces d'impacte, de viscositat i d'acceleració.

S'estudia també la cinètica de desfibratge i el temps necessari per a una desintegració utilitzant com a criteri l'índex de Sommerville. Els estudis realitzats amb diferents papers recuperats mostren diferents comportaments, així com també és diferent el procés segons el disseny de l'aparell desintegrador o "púlper" i del rotor.

L'apartat dedicat als aspectes energètics revisa les variables que s'utilitzen per avaluar aquest aspecte, com són l'energia total dissipada ( $E_t$ ) i el consum específic d'energia (SEC), aquest últim considerat un paràmetre molt interessant des del punt de vista econòmic industrial.

L'aprofundiment en els aspectes bàsics de les forces implicades així com en els aspectes energètics, tenen un important suport en la reologia. El comportament reològic de la suspensió de pasta de paper recuperat té un comportament complex presentant un reograma que no s'ajusta a cap tipus de fluid definit.

En aquest estudi s'exposen els conceptes bàsics de la reologia i el comportament de les suspensions de fibres en diferents condicions, relacionats amb les forces implicades entre els components de la suspensió, que influeixen tant en el seu comportament com a fluid com en el procés de desintegració. En la bibliografia hi ha diverses equacions que relacionen la força necessària per a fer fluir la pasta amb la concentració en fibres, així com relacions del mateix tipus amb la viscositat aparent de la suspensió.

La caracterització de la desintegració utilitza l'anàlisi adimensional amb els paràmetres següents: Número de potència ( $N_p$ ), número de Reynolds ( $Re$ ) i número de Froude ( $Fr$ ). Aquests són funció de l'energia, les característiques geomètriques del sistema d'agitació i les propietats del fluid.

L'anàlisi adimensional permet caracteritzar el sistema agitador amb l'ajut d'un fluid newtonià de viscositat mesurable independentment de les condicions d'agitació. Les variables utilitzades per definir el comportament reològic de la pasta són la viscositat

aparent i el factor de cisallament, que es relacionen mitjançant l'anàlisi adimensional amb les magnituds energètiques. La caracterització del paper permet relacionar-los i determinar-los.

Pel treball experimental s'ha utilitzat un púlper o desintegrador cilíndric amb rotor helicoïdal, equipat amb variador de velocitat i mesura de potència i energia consumida. Els tres tipus de paper recuperat són els que segueixen:

**PQ** Paper estucat d'altra qualitat

**PR** Paper revista

**PF** Paper per a fotocòpies

El capítol de resultats i discussió conté la totalitat de la part experimental de la Tesi. Es divideix en cinc apartats en els quals s'aborden els diferents aspectes estudiats de la desintegració de paper recuperat.

L'anàlisi del temps de desintegració parteix de la determinació d'aquests temps per a cada desintegració amb els tres tipus de paperot estudiat i en el marge de fracció màssica de 0,06 a 0,14 pels papers PR i PF i de 0,06 a 0,18 pel paper PQ. Aquest marge de fraccions màssiques s'ha definit amb la finalitat d'abarcàr tot el marge d'interès.

Per valors inferiors a 0,06 el contingut en fibres és excessivament baix com per tenir interès industrial, mentre que el marge superior és el valor màxim per a cada paperot que s'ha pogut assolir amb el púlper utilitzat. La raó d'aquest valor màxim és que a més fracció màssica la desintegració és inviable per la impossibilitat total de portar a terme la desintegració ja que les propietats reològiques de la pasta ho impedeixen.

S'observa l'evolució decreixent del temps de desintegració en augmentar la fracció màssica. Aquest estudi s'ha fet a dues velocitats de rotor determinades: 19 i 26 rev/s. S'observen també els diferents resultats obtinguts a aquestes dues velocitats per a cada paper.

Es mostra gràficament l'evolució del temps de desintegració en funció de la fracció màssica per a cada tipus de paper i velocitat d'agitació. Es mostren també les equacions que presenten un bon ajust amb les corbes esmentades.

S'observa i compara el comportament de cada paper, establint l'ordre de rapidesa amb el que es desintegren. A partir d'aquest comportament i de les característiques físiques mesurades dels tres papers s'intenta establir relacions entre variables i obtenir explicacions del comportament. Donada la dificultat de concloure amb seguretat, s'ha fet un estudi de la capacitat d'hydratació del paper expressada com a percentatge d'aigua absorbida pel paper sobre pes d'aquest, en ser submergit en aigua.

Aquests assaigs s'han fet amb diferents geometries de paper, amb aigua a temperatura ambient i a 50°C, i s'han fet les determinacions en funció del temps d'immersió.

Els resultats han permès completar el coneixement de les propietats dels papers, però tampoc han estat definitius per establir la causa del comportament dels papers en quan a temps de desintegració, quedant palesa la complexitat del procés i la dependència de múltiples factors alhora.

Tal com diu la bibliografia, es constata que el comportament de cada paper es pot separar en dos en funció de la fracció màssica, establint que aproximadament a la fracció màssica de 0,09 s'observa un comportament diferenciat de les suspensions. Es presenten les corbes d'ajustament per a la variació del temps de desintegració en funció de la fracció màssica pels dos intervals separats, obtenint lògicament una correlació més elevada.

Per aprofundir-hi més, s'utilitza la variable velocitat mitjana de desintegració, quocient entre l'increment d'índex de Sommerville i el temps. Es mostren les corbes, els valors i equacions d'ajust tant totals com en els dos intervals de  $X_m$  esmentats.

El temps de desfibrat necessari per a fer una desintegració implica el número de desintegracions que es poden fer en un determinat temps (per exemple, una hora) i juntament amb la quantitat de paper que conté el púlper, calcular la producció horària del procés.

S'ha determinat la producció del púlp per en totes les condicions de treball estudiades i representat gràficament en relació a la velocitat mitjana de desintegració i la fracció massica per tots els casos, determinant la gran importància del control de les condicions de treball del púlp per en la seva producció, amb les fortes implicacions econòmiques que això té a nivell industrial.

S'estudia també la relació entre la velocitat mitjana de desintegració expressada com a  $1/t_D$  i les forces implicades en el desfibrat, tal com es descriuen en la bibliografia. Es troba una interessant correlació entre els dos paràmetres, encara que només s'ha pogut descriure amb les forces totals de desfibrat ja que és difícil valorar cada una de les forces degudes als diferents mecanismes implicats en el desfibrat.

En l'apartat 4.3, on s'estudien els aspectes energètics de la desintegració, es parteix dels valors de l'energia total consumida en cada desintegració i el temps de la desintegració per a cada paper, velocitat de rotor i fracció massica.

S'observa l'evolució del consum d'energia en funció de la fracció massica, establint-se també les necessitats energètiques en cada cas i cada paper. S'ordenen els tres papers en funció del consum d'energia necessari en cada cas. Es defineixen i calculen els paràmetres consum específic d'energia (SEC), producció (PROD), i potència total (Pt) per cada paper, velocitat del rotor i fracció massica, per a poder estudiar la seva evolució i relacionar-los entre ells i amb altres paràmetres.

En quan al SEC, s'observa la seva evolució en funció de la fracció massica per tots els papers i velocitats de rotor, amb una gran variació, que si bé ja s'observen en el mateix sentit en l'energia total en funció de  $X_m$ , és molt més accentuat encara en estudiar l'energia específica. El canvi observat en l'energia s'amplia en augmentar el contingut en fibres en les desintegracions que menys consumeixen. S'han representat gràficament per totes les condicions els valors de SEC observant-ne el comportament, regular en tots els casos.

El càlcul de la potència consumida, que determina les característiques de l'equipament industrial, denota que les condicions de treball reporten grans beneficis en els aspectes de consum energètic i producció de fibres, i en canvi no requereixen augmentar les condicions de l'equip en la mateixa proporció.

S'observa un comportament diferent del paper PF respecte dels altres en l'aspecte energètic, en referència a la velocitat del rotor. En ser l'estudi només a dues velocitats de rotor, no permet arribar a resultats més concrets, però tot sembla indicar que pels aspectes energètics hi ha una velocitat de rotor que dóna un comportament òptim i així com pels papers PQ, PR la velocitat més favorable és la velocitat alta (entre les dues estudiades), en canvi pel paper PF és més favorable la velocitat baixa.

Probablement no és cap d'elles la velocitat òptima per a cada paper, però sí que el resultat denota un comportament diferent pel paper PF, i per tant des del punt de vista energètic té un comportament diferent, presentant unes condicions òptimes diferents. Aquest comportament s'observa tant amb Et com amb SEC.

Per aproximar l'estudi energètic de la desintegració al concepte d'energia de desfibrat i forces implicades en el procés, s'utilitzen les variables  $E_{\phi}$  (energia en el buit),  $E_{H_2O}$  (energia en l'aigua),  $E_{Ts}$  (energia transferida a la suspensió) i  $E_{TF}$  (energia transferida a les fibres).

D'aquesta manera s'ha determinat la potència i l'energia consumides pel púlper quan treballa sense cap matèria en el seu interior, anomenada energia en el buit, la potència i energia quan el púlper conté aigua en les mateixes condicions que una desintegració, anomenada  $E_{H_2O}$ . En els dos casos l'evolució de l'energia consumida en funció del temps és una recta i la potència és constant.

Com que tant  $E_{\phi}$  com  $E_{H_2O}$  es poden considerar energies que no es consumeixen específicament per a desfibrar, en certa manera són pèrdues, i restades de l'energia total donen  $E_{TF}$  i  $E_{Ts}$ .  $E_{Ts}$  és l'energia que es transfereix a la suspensió descomptant la part d'energia que es consumeix en moure les parts mecàniques del púlper. La  $E_{TF}$  que anomenem energia transferida a les fibres, és  $E_T - E_{H_2O}$  i és l'energia que cal donar a la suspensió en unes condicions d'agitació, degut a la presència de fibres.

Així, en disminuir el temps de desintegració, tant la quantitat d'energia  $E_{\phi}$  com  $E_{H_2O}$  disminueixen proporcionalment i, per tant, l'energia aplicada que no es consumeix en desfibrar és funció del temps de desintegració i per tant també de  $X_m$ .

Per analitzar l'eficàcia de desintegració s'ha definit aquest paràmetre a partir d'altres paràmetres bibliogràfics, però amb la particularitat que l'eficàcia així definida és zero quan la suspensió no conté fibres i augmenta en augmentar el valor de  $E_{TF}$ .

S'estableix també el rendiment energètic dels tres tipus de paper en funció de  $X_m$  per les dues velocitats.

El pendent de la recta de regressió defineix la eficàcia de desintegració de cada paper. Per cada paper s'han calculat diversos paràmetres energètics: els ja esmentats  $E_\phi$ ,  $E_{H20}$ ,  $E_{TF}$  i  $E_{Ts}$ , així com també els percentatges sobre l'energia total, per fer-los de magnitud comparable entre ells. D'aquesta manera s'observa de manera més clara les tendències que ja s'havien constatat, i se n'obtenen algunes de noves, com la de  $\%E_{TF}$ .

La descripció i estudi del comportament dels tres papers dóna tendències comparables entre ells, excepte en la influència de la velocitat del rotor pel paper PF, com ja s'havia observat. De la mateixa manera, la tendència contrària d'aquest paper indica una velocitat de rotor òptima diferent des del punt de vista energètic.

El mateix estudi es va fer emprant el SEC a les dues velocitats. El percentatge d'energia transferida a les fibres respecte de la transferida a la suspensió permet fer també un nou estudi comparatiu del comportament dels tres papers en funció de  $X_m$ . Els resultats donen comportaments que no mantenen relació amb els altres comportaments observats.

En l'apartat 4.4 dedicat a la viscositat aparent i energia de fluidització, s'han estimat els valors de  $\mu_a$  de les suspensions i s'han relacionat amb alguns paràmetres energètics. S'observa que  $\mu_a$  té la mateixa tendència que  $1/t_D$  respecte a la consistència i s'observa coincidència amb la bibliografia que tracta d'aquest tema.

La variació de SEC en funció de  $\mu_a$  assenyala també tendències semblants a totes les condicions.

La potència de fluidització definida com la potència necessària per unitat de volum de suspensió per fer esdevenir la suspensió un fluid homogeni continu, s'ha calculat i se'n ha estudiat l'evolució en funció de  $X_m$  i comparat els tres papers.

La modelització del púlper s'ha desenvolupat en l'apartat 4.5 mitjançant l'anàlisi adimensional. Primerament s'han determinat les dades necessàries per a la modelització ( $\mu$ ,  $\rho$ ,  $P_n$ ) i s'han estudiat les relacions entre elles. A continuació s'han calculat els paràmetres  $N_p$ ,  $Re$  i  $Fr$  per dissolucions de glicerina en diferents condicions d'agitació, necessaris per a fer la modelització, que es visualitza en la representació gràfica de  $N_p$  en funció de  $Re$  per a cada condició, obtenint les corbes característiques del púlper. Aquest estudi s'ha fet pels dos rotors amb els quals està equipat l'aparell utilitzat.

La modelització comporta obtenir un model que relacioni les diferents variables adimensionals. S'ha obtingut aquesta relació amb bon resultat per concentracions altes de glicerina amb diferents valors de les constants  $k$ ,  $x$  i  $y$  en l'expressió  $N_p = k Re^x Fr^y$ . Els valors de les constants depenen de les condicions d'agitació (de 3 a 16 rev/s i de 18 a 33 rev/s).

En ser les suspensions papereres fluids no newtonians, no té sentit parlar de viscositat, però es pot substituir per la viscositat aparent. Recents estudis utilitzen un concepte més general anomenat factor de cisallament ( $\lambda$ ) que substitueix a la viscositat aparent calculada a partir de l'expressió de modelització del púlper i les determinacions oportunes amb cada suspensió i condicions d'agitació.

En l'annex A.4.5.1 i A.4.5.2 es donen les dades per la modelització del púlper amb rotor helicoïdal i pla respectivament. L'objectiu de la modelització del púlper té com a finalitat poder quantificar d'una forma global les forces en el procés de desfibratge. D'aquesta manera podem correlacionar el comportament de les suspensions dels diferents paperots en quant als temps de desintegració, consum específic d'energia i consum de potència amb els factors de cisallament obtinguts ( $\lambda$ ).

A partir de la resolució del model plantejat a l'apartat 4.5, s'obté l'expressió 5.1 que segueix:

$$N_p = 7.76 Re^{-0.232} Fr^{-0.59} \quad (\text{eq. 5.1})$$

Aquesta expressió permet aïllar  $\mu$  i substituir-la per  $\lambda$ .

En l'apartat 4.6 es determinen totes les dades necessàries per calcular els valors de  $\lambda$  de les suspensions de paper en les condicions estudiades. Es representen els valors de  $\lambda$  en funció de la fracció de fibres de cada paper ( $\phi_F$ ) i per a cada consistència. Així mateix s'ha representat  $\lambda$  en funció de  $t_D$ , **SEC** i  $\mu_a$  i s'observen les correlacions obtingudes.

Calculant l'energia neta dissipada a la suspensió a partir de l'equació de modelització, s'observa una bona correlació amb els valors determinats experimentalment. Aquesta correlació és bona de manera global, però menys si es comparen per cada paper per separat.

Finalment s'ha determinat la correlació entre la potència neta consumida per la suspensió i  $\lambda$ , pels diferents papers i velocitats d'agitació.





## 5.2. Conclusions generals

- El temps de desintegració ( $t_D$ ) per un objectiu de desintegració disminueix potencialment en augmentar la fracció màssica per una gamma de fraccions màssiques mitjanes (0,08-0,18) i baixes (0,06-0,08).
- Ni les propietats en sec ni en humit dels paperots justifiquen plenament l'ordre de magnitud dels temps de desintegració dels diferents paperots.
- Si s'atribueixen intensitats relatives a les forces totals de desfibratge o desintegració, formulades per Paraskevas, s'obté una bona correlació amb el temps de desintegració.
- L'augment de la velocitat del rotor fa disminuir, en general, els temps de desintegració i també el factor de cisallament, essent l'efecte més significatiu a baixes fraccions màssiques que a mitjanes.
- La disminució del temps de desintegració fa créixer la velocitat mitjana de desintegració i l'eficàcia de l'operació de desintegració.
- L'evolució del temps de desintegració amb la fracció màssica té efectes importants sobre la producció i disponibilitat de l'equipament per un mateix objectiu de desintegració.
- Els temps de desintegració estan molt ben correlacionats amb el factor de cisallament, disminuint a mesura que el factor de cisallament augmenta, per una mateixa velocitat de rotor.
- La variació de consum energètic varia de forma lineal amb el temps, alhora s'observa que el consum energètic decreix potencialment en augmentar la fracció màssica.
- L'estalvi energètic que es produeix, mesurat com a consum específic d'energia és molt elevat. Són típics estalvis de més de 500% en paper de qualitat estucat,

al passar de una fracció màssica de 0,08 al 0,14, o del 250% en paper revista i 350% en paper fotocòpia.

- L'estalvi energètic observat i la disminució del temps de desintegració comporten un augment de la potència instal·lada. En molts casos superior al 50% al passar de 0,08 a 0,14 de fracció màssica.
- El consum específic d'energia es un paràmetre ben correlacionat amb el factor de cisallament.
- L'eficiència energètica de cada operació de desintegració, definida amb l'expressió  $(1-E_{H_2O}/E_T)$ , creix linealment amb la fracció màssica passant del valor 0 a  $X_m=0$  fins al valor màxim teòric de 1. El fet de que l'ordenada a l'origen sigui igual a zero dóna sentit a l'expressió utilitzada que fa que en una suspensió sense fibres l'eficiència energètica de desfibrat sigui zero, i l'extrapolació dels valors experimentals passa raonablement per aquest punt.
- En augmentar la fracció màssica, el % d'energia sobre el total consumit per la suspensió, absorbit per rodaments i transmissió decreix sensiblement. En el mateix sentit succeeix amb l'aigua. Per contra augmenta el % d'energia transmesa a la suspensió i a la fracció sòlida.
- En augmentar la fracció màssica també s'estalvia aigua i calor com a conseqüència del creixement de la fracció sòlida.
- Les mesures i estimacions de viscositat aparent de la bibliografia, presenten una evolució molt ben correlacionada amb l'invers del temps de desintegració i amb el consum específic d'energia.
- La potència de fluidització és sensiblement inferior a l'obtinguda a la bibliografia i respon quantitativament a l'evolució que presenten els papers en quant al seu contingut en càrrega. La potència és menor com més càrrega té el paper, degut a la major presència de fibres per una mateixa fracció màssica.

- S'ha modelitzat el púlper amb l'ajuda de fluids newtonians. En el model, la viscositat és funció de la potència neta, el pes específic, la velocitat del rotor, i el tipus de rotor.
- En el cas del púlper equipat amb rotor helicoïdal, per tenir un bon ajustament de la viscositat en funció de les variables esmentades, cal una expressió per velocitats fins a 17 rev/s i una altra expressió fins a 33 rev/s.
- Pel rotor pla és possible una sola expressió de viscositat en tot el marge de velocitats.
- Hi ha una excel·lent correlació entre els números de potència experimentals i els calculats, que validen les expressions de modelització del púlper trobades.
- Aplicant el model és possible calcular el factor de cisallament de qualsevol suspensió d'acord amb la generalització del concepte de viscositat aparent de Metzner i Otto.
- Els factors de cisallament calculats mostren una evolució potencial creixent en augmentar la fracció màssica.
- Aquests factors justifiquen plenament el comportament del temps de desintegració i consum específic d'energia observats experimentalment.
- La magnitud del factor de cisallament es veu fortament influenciada per la velocitat del rotor.
- En general sembla que el factor de cisallament és directament proporcional al contingut de cel·lulosa de la suspensió.
- El factor de cisallament no distingeix entre càrregues procedents de la capa d'estucat o en massa, que hi ha a la suspensió.
- Globalment, hi ha una bona correlació entre les energies dissipades a la suspensió experimentals i les energies calculades a partir de l'energia dissipada obtinguda segons el model.

- La potència neta consumida per la suspensió i el factor de cisallament mostren una correlació lineal.

## **6. BIBLIOGRAFIA**



## 6. BIBLIOGRAFIA

**Ackermann C., Putz H.J., Götsching L. (1997):** *4<sup>th</sup> CPPA Research Forum on Recycling*, Québec, 6-10 oct. 59-66.

**Aikawa Y., Kanazawa T. (1982):** *Japan Pulp and Paper* 19 (4),52-63.

**Amaral M.E., Renaud M., Roux J-C. (2000):** *Revue ATIP*.54 (3-4) 76-84.

**Amaral, M.E (1997):** Tesis Master. Universidad de Beira Interior.

**Anderson, S.R., Nordstrand T., Rasmuson A. (2000):** *Journal of Pulp and Paper Science*, 26 (2) 67-71.

**Anderson, S.R., Rasmuson, A. (1997):** *Journal of Pulp and Paper Science* 23(1) 5-11.

**Bates et. al (1960):** «Mixing Theory and Practice» 1, Uhl and Gray, Academic Press, New York.

**Bennington C.P.J. (1998a):** *Paper Recycling challenge vol. 3: Process Technology 1998*, Chapter 19, Doshi M.R. & Dyers J.M. Editors, Appleton, 268-282.

**Bennington C.P.J., Kerekes R.J. (1996):** *TAPPI Journal* vol. 79 n° 2, February 1996, p. 253-258.

**Bennington C.P.J., Smith J.D., Sui O.S. (1998b):** *Journal of Pulp and Paper Science* 24 (11) 341-348.

**Bennington C.P.J., Smith J.D., Sui O.S., Wang M-H. (1998c):** *TAPPI Pulping Conference*, Montréal, October 1083-1095.

**Bennington, C.P.J (1988)** Tesi doctoral. Universitat de British Columbia.



**Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. (1978):** "Fenómenos de transporte : un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento" Reverté 1.3 -1.15.

**Blanco M.A., Barbadillo P., Tijero J., Pérez M.J.; Rodríguez F. (1993):** *Cellulosa y Papel (Chile)* 9 (3) 30-34.

**Brouillette F., Daneault C., Dorris G. (2000) :** "Désencrage des vieux journaux et des vieilles revues : est-il avantageux de réduire le pH du tritrateur", *Conférence Technologique Estivale*, Québec, 7-9 June 87-92.

**Button A.F., Picard K. (2002):** *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 September.

**Carré (1995a):** "Physico-Chemical aspects of deinking", 2<sup>nd</sup> advanced Training Course on Deinking Technology, Grenoble (França) CR 3316.

**Carré B, Galland, G, Julien Saint Amand, F (1995b):** «Control of detachment and removal of ink by image analysis», 3rd Research Forum on Recycling Proceedings, Vancouver (Canadá) 73-88.

**Carré, B, Galland G, Vernac Y, Suty H (1995d):** «The effect of hydrogen peroxide bleaching on ink detachment during pulping and kneading » 2<sup>nd</sup> Advanced Training Course on Deinking Technology, Grenoble (França).

**Carré, B, Galland, G, Julien Saint Amand, F. (1995c):** 6<sup>th</sup> PTS Deinking Symposium, München (Alemanya). Chap. 5, Tappi Press, Atlanta, 35-41.

**Chase W.C., Donatelli A.A., Walkinshaw J.W. (1989):** *TAPPI Journal* vol. 72 (5), 199-204.

**Cherbit, M, Roux, J.C.(2004):** *Revue ATIP* 58 (2).

**Cleveland C.F. (1993):** *Secondary Fiber Recycling*, Chapter 12: Pulping of secondary fiber, edited by R.J. Span Genberg, TAPPI Press, Atlanta, 91-100.

**Dosch J.B., Singh K.M., Stenuf T.J. (1986):** TAPPI Engineering Conference, vol.2, Atlanta, 22-25 September 721-722.

**Duffy G.G., Longdill G., Lee P.F.W. (1978):** *TAPPI Journal* vol. 61 (8) 85-88.

**Emery G., Cook S. (1998):** *TAPPI Recycling Symposium*, New Orleans, 8-12 March 505-514.

**Fabry B., Carré B. (2002):** *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 Setembre.

**Fabry B., Roux J-C., Carré B. (2000):** "Pulping, a key factor for optimising deinking", 53<sup>ème</sup> Congrès ATIP, Bordeaux, 17-19 October.

**Fabry, B. Carré, B. (2003):** "Pulping and ink detachment", 6<sup>th</sup> CTP/PTS Advanced Training Course on Deinking Technology, n° 6, Grenoble, France, March 18-19-20.

**Fabry, B., (1999):** Tesi Doctoral. Institut National Politechnique de Grenoble.

**Fallows J.D. (1996):** "Pulper & pulper screens", *TAPPI Deinking Short Course*, Houston, 10-12 June.

**Fisher P.C., Shaw G. (2002):** "Operating results of new TwinDrum<sup>TM</sup> pulping concept at SP Newsprint Co, Newberg, Oregon" *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 September.

**Grantz D.C. (1984):** "Low energy pulping of secondary fiber", *TAPPI Engineering Conference*, Boston, 17-20 September 9-14.

**Gullichsen J., Härkönen E. (1981):** *TAPPI Journal* vol. 64 (6), 69-72.

**Hamilton, F.R (1987):** "Pulping systems". Pulp & Paper Manufactures, 3 cap. XVI Secondary Fibers and Non-Wood Pulping, published by the Joint Textbook Committee of the Paper Industry, TAPPI, CPPA.

**Harrop N.M., Wiseman N. (1999):** *53<sup>rd</sup> APPITA Conference*. vol.2, Rotorua (New Zealand), 19-23 April. 809-815.

<http://www.voithsulzer.com>

**Hietaniemi J., Gullichsen J. (1996):** *Journal of Pulp and Paper Science* 22 (10) 469-474.

**Himanen J. (1995):** *Papex'95, 2<sup>nd</sup> International Seminar on Pulp and Paper Industry*, New Delhi, 9-11 December 295-302.

**Holik, H., (1988):** *TAPPI Engineering Conference*, Chicago, 19-22 September, 1988, p. 59-64.

**Iwamoto T. (1982):** *Japan TAPPI Journal* 36 (1), 59-64.

**Kankaanpää V. (2002):** "Fundamental pulping research with pilot plant drum pulper", *TAPPI Fall Conference & Trade Fair*, San Diego, 8-12 September.

**Kerekes R.J., Soszynski R.M., Tam Doo P.A. (1985):** 8<sup>th</sup> Fundamental Research Symposium, vol. 1, Oxford, 265-310.

**Kerekes, R.J. (1995):** International Paper Physics Conference, Niagara, 11-14 septembre, 23-31.

**Kerekes, RJ (1996):** TAPPI Engineering Conference, 1, Chicago, 16-19 septembre, 21-28.

**Koffinke R.A. (1983):** *TAPPI Pulping Conference vol.1*, Houston, 24-26 October 133-137.

**Lafon M-O. (1997):** "Optimisation d'agents de désencrage à base de tensioactifs", 50<sup>ème</sup> Congrès ATIP, Grenoble, 21-24 octobre.

**Lamort P. (1976):** *Revue ATIP* .30 (2), 56-60.

- Lamort P., Lamort de Gail B. (1980):** *Papier Carton et Cellulose* .29 (4), 60-61.
- Lindsay M. (1983):** *TAPPI Pulping Conference* vol. 1, Houston, 24-26 October 151-154.
- Lombardo, G. Muratore, E. (1992):** *Revue ATIP*(46) 3.
- McCabe (1991):** “Fenómenos de Flujo de Fluidos” Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, Mc Graw Hill, Inc, 3, 41-51.
- Mentz J.R. (1991):** *TAPPI Pulping Conference*.1, Orlando, 3-7 November 83-84.
- Merrett K.J. (1987):** *Appita* 40 (3)185-188.
- Metzner A.B., Otto R.E. (1957):** *Journal of American Industrial and Engineering Chemistry* vol. 43 nº 3, Mars 1957, p. 3 -10.
- Momdouh A.B., Koffinke D. (1990):** *Pulp and Paper* 64 (9), 218-219.
- Müller W. (2000):** *Twogether-Paper Technology Journal*, (2) 18-19.
- Mulligan D.B. (1995):** *Progress in Paper Recycling* 4 (2)12-17.
- Mutjé P., Lopez A., Puig J., Vilaseca F., Pèlach M.A. (2001):** Ingeniería Química, 378, 115-119.
- Mutjé P., Presta S., Pèlach M.A, Vilaseca F., Roux, JC. (2003):** Chemical Industry and Environment IV, 1, 415-424.
- Mutjé, P, Vilaseca, F, Puig, J, Pèlach, M.A (2001):** Ingeniería Química, 375, 301-307.
- Nerg H., Pousi J., Hourula I., Juutinen V., Heimonen J. (1999):** *TAPPI Recycling Conference* 3, Atlanta, 1-4 Març 985-999.

**Paraskevas, S. (1982):** Pulp and Paper, 10, 85-87.

**Paraskevas, S. (1983):** TAPPI Pulping Conference, vol. 1, Houston, 24-26 October 1983, p. 129-132.

**Pèlach, M.A. (1997):** "Procés de destintatge del paper per flotació. Avaluació de l'eficàcia d'eliminació de tinta", Tesi Doctoral, Universitat de Girona.

**Pfalzer L. (1983):** *TAPPI Pulping Conference* vol.1, Houston, 24-25 October 139-143.

**Radoslavova D., Silvy J., Roux J-C. (1996):** TAPPI Papermakers Conference, Philadelphia, 24-27 Març 195-206.

**Roustan M. Pharamond J.C., Line A. (1985):** "Agitation-mélange» Technique de l'Ingénieur, Traité Génie des Procédés J2.II, Opérations Unitaires J3800.

**Ruzinsky F., Kokta B.V. (2000):** *Progress in Paper Recycling* 9 (2),30-39.

**Savolainen, A. Jussila, T. Nikula, S (1991):** TAPPI Journal 74 (11) 147-153.

**Siewert, W. (1984):** *Das papier* 38 (7).

**Stinson S. (1991):** *Chemical Engineering. News* 69 (1), 22.

**Thalen N, Wahren, D (1964):** Svensk Papperstidning 67 (7) 359-264.

**Thieule J.M (1999):** Tesis Doctoral Institut National Politechnique de Grenoble.

**Thomson H. A (1986):** TAPPI Engineering Conference, 2, Atlanta, 22-25 Septembre 593-596.

**Tremblay E., Sain M.M., Daneault C., Lapointe M. (1998):** *Progress in Paper Recycling* 8 (1), 45-53.

**Vielreicher T., Müller-Steinhagen H., Alien M., Duffy G.G. (1994):** *Appita Journal* 47(3) 221-226.

**Vilaseca, F (1999):** Tesi Doctoral. Universitat de Girona.

**Vilaseca, F, Gou, M, Pèlach, M.A, Mutjé, P (2000):** Investigación y técnica del papel, 145 423-438

**Virëa S.J. (1983):** *TAPPI Pulping Conference vol. 1*, Houston, 24-26 October 155-161.

**Wahren D. (1979):** Conference Paper Science and Technology, Appleton, 8-10 Maig 112-129.

**Yackel C. (1990):** "Pulp and paper agitation: the history, mechanics and process", TAPPI Press, Atlanta, 91-100.