



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Impacte ambiental de la valorització d'un residu industrial aviari per a l'obtenció de materials compòsits

Gemma Molins Duran

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de doctorat en sostenibilitat

Impacte ambiental de la valorització d'un residu industrial aviari per a l'obtenció de materials compòsits

Tesi doctoral realitzada per:

Gemma Molins Duran

Dirigida per:

Dr. Fernando Carrillo Navarrete

Dra. María Dolores Álvarez del Castillo

Departament d'enginyeria química

Terrassa, 2023

Comença fent el que és necessari,
després fes allò que sigui possible i
acabaràs fent l'impossible.

Sant Francesc d'Assís

Resum

La producció de carn de pollastre ha augmentat en els últims anys i es preveu que ho segueixi fent, això fa que també augmenti la generació de residus derivats de la indústria aviar. Les plomes de pollastre (PIP) són uns d'aquests residus i es busquen solucions per tal de valoritzar-les. Una opció és la seva utilització en materials compòsits fets amb poliàcid làctic (PLA) amb l'objectiu d'obtenir un material plàstic biodegradable amb un baix impacte ambiental. En aquesta tesi s'ha fet un estudi de les propietats i dels impactes ambientals d'aquest material compòsit. Per a la seva fabricació, en primer lloc, cal estabilitzar les PIP que surten de l'escorxador, després es trituren i finalment es mesclen amb el PLA fos per conformar plaques de material compòsit. En relació amb les propietats s'han analitzat les propietats mecàniques de tracció, l'estabilitat en l'absorció d'aigua, la densitat i la compatibilitat entre fibra i matriu mitjançant espectroscòpia FTIR i SEM. Els resultats apunten que l'addició de PIP al PLA té pocs efectes sobre el mòdul de Young tot i reduir la resistència a la tracció i l'allargament a la ruptura. L'anàlisi espectroscòpica mostra una interacció feble entre fibra i matriu, suggerint que les PIP són un bon material de càrrega, però no es poden considerar un material de reforç. Pel que fa als impactes ambientals s'han estudiat mitjançant la metodologia de l'anàlisi de cicle de vida (ACV). En primer lloc, s'han comparat dos processos diferents d'estabilització de les PIP, un tractament amb vapor i un altre amb tensioactiu catiònic. Els resultats permeten veure que l'estabilització amb vapor té un impacte menor en les categories estudiades. Les plomes estabilitzades són triturades i foses juntament amb el PLA per conformar una placa de material. Els resultats mostren que l'ús de PIP en materials compòsits amb PLA pot reduir l'impacte del material, sent la producció del PLA la que contribueix més a l'impacte, i que l'entrada al sistema amb més impactes és el consum d'electricitat. Tot i que la tesi estudia l'impacte del material sense tenir en compte el procés de cria del pollastre, s'ha estudiat la seva influència en l'impacte del material arribant a la conclusió que no és significativa.

Abstract

Chicken meat production has increased in recent years and is expected to continue growing, which also increases the generation of waste from the poultry industry. Chicken feathers (PIP) are one of these wastes and solutions are being sought to valorise them. One option is its use in composite materials made with polylactic acid (PLA) with the aim of obtaining a biodegradable plastic material with a low environmental impact. In this thesis, a study of the properties and environmental impacts of this composite material has been performed. For the manufacture of this material, first of all, it is necessary to stabilize the PIPs that leave the slaughterhouse, then they are crushed and finally mixed with the melted PLA to form plates of composite material. In relation to the properties, the tensile mechanical properties, the dimensional stability in water absorption, the density and the compatibility between fiber and matrix have been analysed using FTIR and SEM spectroscopy. The results indicate that the addition of PIP to PLA has little effect on the Young's modulus despite reducing the tensile strength and elongation at break. Spectroscopic analysis shows a weak interaction between fiber and matrix, suggesting that PIPs are a good filler material, but they cannot be considered as a reinforcing material. As for the environmental impacts, they have been studied using the life cycle analysis (LCA) methodology. Firstly, two different processes of stabilization of PIP have been compared, one treatment with steam and another with cationic surfactant. The results allow us to see that stabilization with steam has a smaller impact on the categories studied. Feathers stabilized are crushed and melted together with PLA to form a sheet of material. The results show that the use of PIP in composite materials with PLA can reduce the impact of the material, with the production of PLA contributing the most to the impact, and that the input to the system with the most impacts is the consumption of electricity. Although the thesis studies the impact of the material without taking into account the process of raising the chicken, its influence on the impact of the material has been studied, reaching the conclusion that it is not significant.

Agraïments.

A mi m'agrada veure aquests anys de treball com una travessia a mar obert, d'aquelles que tant m'agrada fer.

El suport econòmic per fer-la prové, en gran part, dels projectes MAT 2010–17057 i MAT2015-65392-C2-1-R (MINECO/FEDER), del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Però, per fer les travessies, calen moltes coses més.

El camí per arribar a l'arc de sortida i els entrenaments previs, els he fet gràcies als meus pares i germans, que m'han permès estudiar el que m'agrada i lluitar pels meus somnis.

A l'arc de sortida, i durant tot el camí, fent el seguiment de la travessia, hi he trobat el Fernando i la Dolors, sense els quals mai no hauria començat aquesta tesi: gràcies, Fernando, per aquella conversa llarga i profunda dalt d'un tren, i a tu, Dolors, per les mil i una hores al despatx, escoltant els meus dubtes i les meves pors; heu estat sempre allà, fent de guies, ensenyant-me totes les coses imprescindibles per fer la tesi, o deixant-me espais de calma quan els he necessitat. La llista de coses a agrair-vos és molt llarga, ho sabeu i us la repetiré tantes vegades com calgui. De nou, gràcies, Fernando i Dolors, per dirigir aquesta tesi amb tanta paciència i dedicació.

Al llarg del camí, hi ha moltes persones que han fet de boies, per tal que no em perdés: gràcies a totes les persones que han format part de l'equip, plomes: sense la vostra bona feina hauria estat impossible presentar aquests resultats i aquestes conclusions. En especial, gràcies a la Núria, per tantíssimes hores de conversa per fer-me créixer i no deixar-me defallir; gràcies, Jorge, per les teves crítiques i el teu suport, imprescindibles per avançar, i gràcies, Xavi, pel teu bon fer i la teva paciència.

Les boies assenyalen el camí, però també calen els surfs de rem ("*paddle surf*") i caiacs, per garantir la seguretat i controlar que no et perdis. En aquesta part, Pere has estat fonamental: has liderat aquest equip, amb l'Enric, la Judit, l'Estel, el Roger, el Jordi, fent que no defallís ni em perdés, tot i les moltes estones de mala mar que hi ha hagut durant aquests anys i esperonant-me a aprofitar el moment de calma per avançar més ràpid.

Gràcies, Déu meu, pels talents que m'has donat i per infondre'm la força interior que he necessitat per fer totes les braçades que han calgut fins arribar al final.

Ara ja sóc a la platja, a punt de passar per l'arc d'arribada, on també hi ha una pila d'amistats que n'han donat suport, i sense les quals la travessia hauria estat més difícil. Impossible posar aquí tots els vostres noms, ompliríem moltes planes, però ja us ho he dit a tots personalment.

Mil gràcies a tots els que heu fet possible que comencés, i que arribés al final, sense compartir-ho amb vosaltres no tindria sentit fer aquesta tesi.

Índex de continguts

Resum	3
Abstract	4
Agraïments	5
Índex de continguts	7
Índex de figures	11
Índex de gràfiques.....	13
Índex de taules.....	15
Llistat d'abreviatures i acrònims.....	17
1. Introducció.....	19
1.1. Motivació.....	19
1.2. Objectiu de la recerca.....	22
1.3. Estructura de la tesi	22
1.4. Bibliografia.....	24
2. Situació actual de la valorització de plomes de pollastre i dels materials compòsits amb fibres naturals	27
2.1. Valorització de les plomes de pollastre	27
2.1.1. Plomes i fibres de queratina.....	27
2.2. Materials compòsits amb fibres naturals.....	35
2.3. Bibliografia.....	38
3. Caracterització del material compòsit de plomes de pollastre i poliàcid làctic	43
3.1. Materials i preparació del compòsit	44
3.1.1. Àcid polilàctic (PLA)	44
3.1.2. Plomes de pollastre (PIP).....	45
3.1.3. Preparació del material compòsit	45
3.2. Tècniques de caracterització.....	47
3.2.1. Propietats mecàniques de tracció.....	48
3.2.2. Estabilitat dimensional: absorció d'aigua	50
3.2.3. Densitat del compòsit	51

3.2.4. Anàlisi de compatibilitat per espectroscòpia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) i microscòpia electrònica d'escombratge (SEM)	52
3.3. Resultats obtinguts de la caracterització del material amb diferents condicions de producció del material	53
3.3.1. Mòdul de Young	53
3.3.2. Resistència a tensió màxima	55
3.3.3. Deformació a tensió màxima	56
3.3.4. Resistència a la ruptura.....	58
3.3.5. Deformació a la ruptura.....	59
3.3.6. Absorció d'aigua.....	62
3.3.7. Densitat del compòsit	63
3.4. Estudi de la variació de les propietats amb diferents proporcions de plomes	65
3.5. Estudi de la compatibilitat per espectroscòpia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) i microscòpia electrònica d'escombratge (SEM).....	72
3.6. Discussió dels resultats.....	75
3.7. Bibliografia.....	76
4. Metodologia d'anàlisi de cicle de vida	79
4.1. Definició de l'objectiu i abast.....	84
4.1.1. Unitat funcional	85
4.1.2. Límits del sistema	87
4.1.3. Procediments d'assignació de les càrregues ambientals	88
4.1.4. Requeriments de qualitat de les dades	90
4.2. Inventari de cicle de vida (ICV).....	90
4.3. Avaluació de l'impacte de cicle de vida (AICV)	92
4.4. Interpretació.....	100
4.5. Informe del ACV	101
4.6. Revisió crítica	101
4.7. Bibliografia.....	102
5. Aplicació del acv a la producció de plaques de plomes de pollastre i pla.....	105
5.1. Definició de l'objectiu.....	106

5.2. Abast	107
5.2.1. Descripció del sistema a analitzar	107
5.2.2. Funció i unitat funcional (UF).....	113
5.2.3. Límits del sistema.....	114
5.2.4. Qualitat de les dades.....	116
5.2.5. Metodologia d'impacte a utilitzar i categories d'impacte seleccionades	117
5.3. Inventari de cicle de vida (ICV).....	118
5.3.1. Tractament tèrmic amb autoclau	118
5.3.2. Tractament amb tensioactiu catiònic	123
5.3.3. Trituració de les plomes de pollastre	127
5.3.4. Fabricació de la placa de material compòsit	130
5.4. Bibliografia.....	132
6. Anàlisi d'impacte i interpretació dels resultats.....	137
6.1. Avaluació de l'impacte ambiental.....	137
6.1.1. Resultat de l'avaluació d'impacte del procés d'estabilització de les plomes	138
6.1.2. Resultat d'avaluació de l'impacte del procés de trituració i posterior assecat de les plomes de pollastre.....	145
6.1.3. Resultat de l'avaluació de l'impacte del procés de fabricació de la placa de material compòsit	148
6.2. Interpretació dels resultats	152
6.3. Assignació de càrregues ambientals: influència de la cria i matança del pollastre.....	155
6.4. Bibliografia.....	159
7. Conclusions finals	161
7.1. Futures línies d'investigació	163
7.2. Bibliografia.....	164
8. Annexos	169
Annex A: Fitxa tècnica del PLA	171
Annex B: Resultats de les proves de propietats mecàniques.....	175
Annex C: Resultats anàlisi estadístic	187

Annex D: Resultats d'absorció d'aigua	189
Annex E: Resultats de densitat.....	193
Annex F: Dades de consum energètic de la mescladora	200
Annex G: Dades de consum energètic de la premsa.....	210
Annex H: Dades de caracterització de totes les plaques	220

Índex de figures

Figura 1-1: Estructura de la tesi.....	23
Figura 2-1: Estructura d'una ploma	28
Figura 2-2: Estructura de la queratina.....	29
Figura 2-3: Estructura de la cisteïna i de la cistina.....	30
Figura 2-4: Estructures hèlix alfa i full beta.....	31
Figura 2-5: Vies d'eliminació i tractament de les plomes de pollastre. Elaboració pròpia a partir de reglament SANDACH.....	32
Figura 2-6: Rentat de les plomes	34
Figura 2-7: Esquema dels possibles materials compòsits de matriu polimèrica.	36
Figura 3-1: Corba tensió - deformació.....	49
Figura 3-2: Esforç màxim de càrrega vs mòdul de Young per materials biodegradables. Figura feta amb el programa CES-EduPack a partir de dades pròpies i de dades de la seva base de dades. Les marques negres corresponen a diverses fustes amb diferents direccions de veta: transversal (T) o longitudinal (L).....	70
Figura 3-3: Superfície de fractura d'una placa de PLA/PIP amb un 20% v/v. (a) a 200 augments i (b,c) a 2000 augments.....	73
Figura 3-4: Espectre del compòsit PLA/PIP amb diferents percentatges de PIP (5, 10, 15, 20 i 25%) a l'àrea de 3100-2600 cm ⁻¹ (C-H stretching).....	74
Figura 3-5: Espectre del compòsit PLA/PIP amb diferents percentatges de PIP (5, 15, 25 i 35%) a l'àrea de 2000-1400 cm ⁻¹ (C-H stretching).....	74
Figura 4-1: Fases d'un estudi de ACV	84
Figura 4-2: Exemple d'un sistema de producte per un ACV.....	88
Figura 4-3: Exemple d'assignació de càrregues.....	89
Figura 4-4: Passos en l'agregació del ACV.....	94
Figura 4-5: Elements de la fase AICV	96
Figura 5-1: Procés de fabricació de la placa de material compòsit PLA/PIP.....	108
Figura 5-2: Procés tèrmic d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre	118
Figura 5-3: Energia consumida per assecat les plomes després del rentat.....	121
Figura 5-4: Procés d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre amb tensioactiu catiònic.....	124

Figura 5-5: Procés de trituració de les plomes de pollastre.	128
Figura 5-6: Procés de fabricació de la placa de material compòsit.	130
Figura 6-1: Arbre de caracterització de la categoria escalfament global d'una placa amb un 20% de plomes.	147

Índex de gràfiques

Gràfica 1-1: Evolució de la producció de la carn de pollastre. Elaboració pròpia a partir de FAO	20
Gràfica 3-1: Valors de mòdul de Young (MPa) per una placa de compòsit 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C)	54
Gràfica 3-2: Valors de resistència a tensió màxima (MPa) per una placa de compòsit 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C).....	56
Gràfica 3-3: Valors de deformació a tensió màxima per una placa de compòsit 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C).....	58
Gràfica 3-4: Valors de resistència a la ruptura per una placa de compòsit 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C)	59
Gràfica 3-5: Valors de deformació per tracció a la ruptura (%) per una placa de compòsit 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C).....	61
Gràfica 3-6: Absorció d'aigua en diferents condicions de producció per una placa del 20% de plomes...	63
Gràfica 3-7: Densitat en diferents condicions de producció per una placa del 20% de plomes	65
Gràfica 3-8: Propietats mecàniques de tracció en funció del percentatge de PIP del material compòsit...	68
Gràfica 3-9: Densitat (g/cm ³) i absorció d'aigua (%) dels compòsits de PLA/PIP en funció del contingut de PIP.	72
Gràfica 6-1: Anàlisi de l'impacte de 1kg de PIPN estabilitzades amb autoclau utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini	139
Gràfica 6-2: Anàlisi de l'impacte de 1kg de PIPN estabilitzades amb autoclau utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini	141
Gràfica 6-3: Comparació dels impactes de 1kg de PIPN estabilitzades amb autoclau i amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.....	142
Gràfica 6-4: Anàlisi d'incertesa de 1 kg 'Plomes estabilitzades amb autoclau' (A) menys 1 kg 'Plomes estabilitzades amb tensioactiu' (B). Mètode: CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25, interval de confiança: 95 % i 50 runs.	143

Gràfica 6-5: Comparació dels impactes d'estabilitzar 1kg de PIPN amb autoclau i obtenir 1 kg de PIPNT a partir de PIPN utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.	146
Gràfica 6-6: Comparació dels impactes d'obtenir la UF amb diferents percentatges de ploma utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.	150
Gràfica 6-7: Valors de normalització d'una placa 80% PLA i 20% PIPNT seguint el mètode CML-IA modificat	151
Gràfica 6-8: Contribució de les etapes de producció del PLA a les categories d'impacte.....	152
Gràfica 6-9: Impactes de l'obtenció de la placa de material compòsit amb els valors màxims de la cria del pollastre.	158
Gràfica 6-10: Impactes de l'obtenció de la placa de material compòsit amb els valors mínims de la cria del pollastre.	158

Índex de taules

Taula 3-1: Nombre d'experiments i codificació de les mostres.....	46
Taula 3-2: Resultats de mòdul de Young per cada proveta amb un 20% de plomes.....	53
Taula 3-3: Resultats de la resistència a tensió màxima per cada proveta amb un 20% de plomes.....	55
Taula 3-4: Resultats de deformació a tensió màxima per cada proveta amb un 20% de plomes	57
Taula 3-5: Resultats de resistència a la ruptura per cada proveta amb un 20% de plomes.....	58
Taula 3-6: Resultats de la deformació per tracció a la ruptura per cada proveta amb un 20% de plomes .	60
Taula 3-7: Resultats d'absorció d'aigua per cada proveta amb un 20% de plomes.....	62
Taula 3-8: Resultats de densitat per cada proveta amb un 20% de plomes.....	64
Taula 3-9: Proporcions de plomes estudiades.....	66
Taula 3-10: Resultats de propietats mecàniques per les diferents proporciones de plomes.....	66
Taula 3-11: Resultats d'absorció d'aigua i densitat per les diferents proporcions de plomes.....	71
Taula 4-1: Exemples d'unitat funcional	86
Taula 4-2: Exemple de termes de la categoria d'impacte de canvi climàtic	95
Taula 5-1: Contaminació bacteriana dels residus de plomes de pollastre.....	109
Taula 5-2: Fonts de les dades genèriques dels processos	116
Taula 5-3: Dades d'inventari del procés tèrmic d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre.....	119
Taula 5-4: Dades del rendiment del procés tèrmic d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre	120
Taula 5-5: Dades per al càlcul de l'energia necessària per assecat les plomes després del procés de rentat	122
Taula 5-6: Anàlisi de les aigües residuals de sortida de l'autoclau	123
Taula 5-7: Dades d'inventari del procés d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre amb tensioactiu.....	125
Taula 5-8: Dades del rendiment del procés d'estabilització, rentat i desinfecció amb tensioactiu de les plomes de pollastre	126
Taula 5-9: Anàlisi de les aigües residuals de sortida del tractament amb tensioactiu catiònic.....	127
Taula 5-10: Dades d'inventari del procés de trituració de la ploma.....	128
Taula 5-11: Dades de rendiment de la trituració de les plomes	129

Taula 5-12: Dades d'inventari de la fabricació de la placa.....	131
Taula 6-1: Dades de caracterització de 1 kg de PIPN amb autoclau utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.....	138
Taula 6-2: Dades de caracterització de 1 kg de PIPN amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.....	140
Taula 6-3: Comparació de les dades de caracterització de 1 kg de PIPN amb autoclau i amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.....	141
Taula 6-4: Anàlisi de sensibilitat dels impactes ambientals: valors esperats i coeficient de variació (CV) per 1 kg de PIPN amb autoclau i amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 i 5000 runs	143
Taula 6-5: Dades de caracterització de l'obtenció de 1 kg de PIPNT a partir de plomes estabilitzades (PIPNT) utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.....	145
Taula 6-6: Percentatge de contribució del consum d'electricitat en cada procés de la fabricació d'una placa amb un 80% de plomes.....	148
Taula 6-7: Dades de caracterització de l'obtenció de la UF utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.....	149
Taula 6-8: Valors de normalització d'una placa 80% PLA i 20% PIPNT seguint el mètode CML-IA modificat.....	150
Taula 6-9: Resum d'estudis d'impacte ambiental de les etapes de creixement i matança de la producció de carn de pollastre per UF de cada estudi. Elaboració pròpia a partir de les fonts indicades a la taula.....	155
Taula 6-10: Resum d'estudis d'impacte ambiental de les etapes de creixement i matança de la producció de carn de pollastre per UF d'aquesta tesi. Elaboració pròpia a partir de les fonts indicades a la taula.....	157
Taula 6-11: Valors d'impacte de la placa de material compòsit amb un 20% de plomes i de la cria del pollastre fins a l'escorxador per UF.....	157

Llistat d'abreviatures i acrònims

Acidif: Acidificació	FTIR: Espectroscòpia infraroja de transformada de Fourier
ACV: Anàlisi de Cicle de Vida	Glu: Glutamina
Arg: Arginina	Gly: Glicina
Asn: Aspartat	GWP100a: Escalfament Global
Cp: Capacitat calorífica	IA: Impactes Ambientals
CRC: Catàleg de Residus de Catalunya	ICV: Inventari de Cicle de Vida
Cys: Cisteïna	ILCD: International Reference Life Cycle Data System
D: Deformació	LCA: Life Cycle Assessment
DBO₅: Demanda Biològica d'Oxigen a 5 dies	Leu: Leucina
DMA: Disminució de Materials Abiòtics	MES: Matèries en Suspensió
DMACF: Disminució de Materials Abiòtics (Combustibles Fòssils)	NTK: Nitrogen Kjeldhal
DQO: Demanda Química d'Oxigen	OcTerA: Ocupació del Territori Agrícola
DSC: Calorimetria Diferencial d'Escombratge	OcTerN: Transformació del Terreny Natural
E: Mòdul de Young	OcTerU: Ocupació de Territori Urbà
EPD: Declaració ambiental de producte	ODP: Disminució de la capa d'ozó
EtoxAD: Ecotoxicitat en Aigua Dolça	OxFQ: Oxidació Fotoquímica
EtoxM: Ecotoxicitat Marina	PCL: Policaprolactona
EtoxTer: Ecotoxicitat Terrestre	PE: Polietilè
Eutrof: Eutrofització	PEF: Petjada Ambiental de Producte
FAO: Food Agriculture Organization of the United Nations	PLA: Poliàcid Làctic
	PIP: Plomes de Pollastre

PIPN: Plomes de Pollastre Netes

PIPNT: Plomes de Pollastre Netes i
Triturades

PP: Polipropilè

Pro: Prolina

PS: Poliestirè

S: Desviació estàndard

SANDACH: Subproductos Animales
No Destinados al
Consumo Humano

Se: Serina

SEM: Microscòpia electrònica
d'escombratge

SETAC: Society of Environmental
Toxicology and Chemistry

T: Tensió

Thr: Treonina

ToxH: Toxicitat Humana

UF: Unitat Funcional

Val: Valina

WA: Percentatge d'absorció d'aigua

1. Introducció

1.1. Motivació

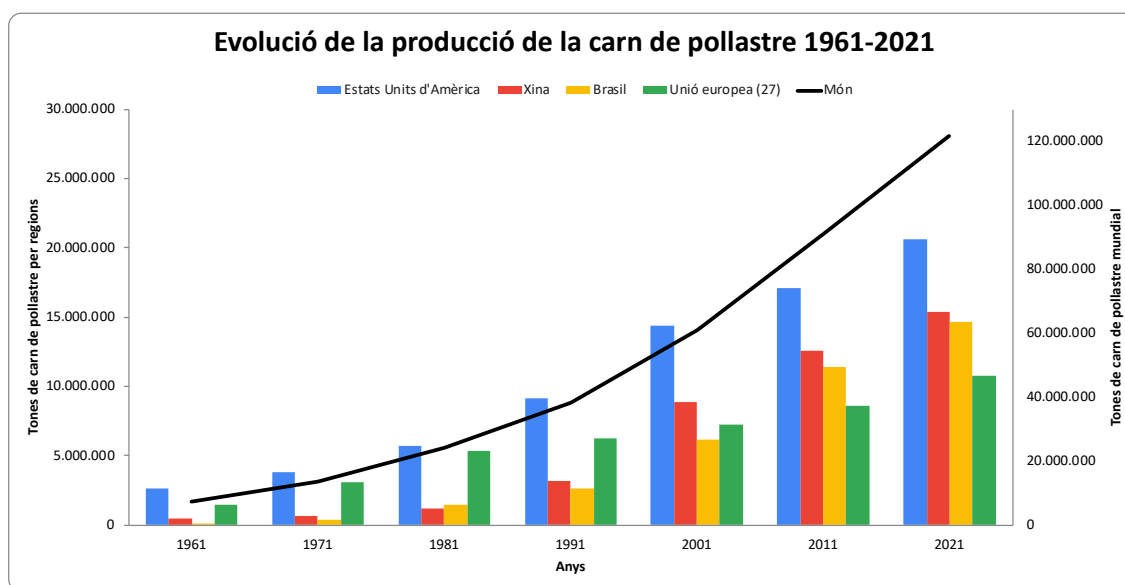
La societat actual es caracteritza, entre moltes altres coses, per ser un sistema consumidor de recursos i productor de residus. Al llarg del segle XX i del que portem de segle XXI la tendència és clarament a l'alça i, si no hi ha canvis, el futur no es preveu diferent (Banc Mundial, 2019; Kaza et al., 2018; Nacions Unides, 2018; OECD, 2019). Un dels canvis de paradigma proposats és el desenvolupament sostenible, que busca un canvi de model que satisfaci les necessitats de la població actual del planeta sense comprometre la capacitat de les futures generacions per satisfer les seves necessitats (Brundtland, 1987). Dins del marc del desenvolupament sostenible, durant els 35 anys que han passat des de la seva proposició dins de l'informe "El nostre futur comú" encarregat per l'Assemblea General de les Nacions Unides i que va propiciar l'inici de les conferències de les Nacions Unides sobre Medi Ambient i Desenvolupament, s'han plantejat moltes propostes per caminar en aquesta direcció.

Una d'aquestes propostes és la de l'economia circular que busca canviar el model de producció lineal actual basat en l'extracció de materials, la producció de productes i la seva disposició final com a residus per un model circular basat en compartir, llogar,

reutilitzar, reparar, renovar i reciclar els materials i productes. Aquest nou model s'ha anomenat economia circular i implica un treball per redefinir tots els processos actuals per tal de dissociar l'activitat econòmica del consum de recursos no renovables i eliminar els residus del sistema de producció des del disseny del procés o producte fins al final de vida del producte (Parlamento Europeo, 2022).

Una de les claus de l'economia circular és una bona gestió dels recursos i dels residus. En aquest sentit, una de les propostes per abordar la conservació dels recursos i minimitzar la contaminació de l'entorn és la valorització dels residus per ser utilitzats com a matèria primera d'un procés.

Si ens fixem en les dades de la FAO, la indústria aviar és la que ha experimentat un major creixement en els últims 60 anys, sent al 2018 gairebé un 37% de la carn mundial produïda (Ritchie, Hannah; Rose, 2017).



Gràfica 1-1: Evolució de la producció de la carn de pollastre. Elaboració pròpia a partir de (FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2023)

A més, la seva producció és generalitzada a tot el planeta, tot i que hi ha 4 grans àrees geogràfiques que tenen una producció més elevada i concentren el 51% de la producció mundial al 2021: els Estats Units d'Amèrica (17%), la Xina (un 13%), el Brasil (un 12%) i la Unió Europea (un 9%) (FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2023).

Aquest augment sostingut de la producció de la carn de pollastre i la seva deslocalització provoca un increment en la producció dels subproductes derivats d'aquesta indústria que cal gestionar de forma adequada a diverses parts del planeta.

Els subproductes de la producció de carn es classifiquen com a Subproductes Animals No Destinats Al Consum Humà (SANDACH, d'ara en endavant) i estan regulats pel reglament CE 1069/2009 del Parlament Europeu i del consell de 21 d'octubre de 2009 pel que s'estableixen les normes sanitàries aplicables als subproductes animals i als productes derivats no destinats al consum humà i pel que es deroga el Reglament (CE) 1774/2002 (Comunitat Europea, 2009). Uns dels SANDACH de la producció de carn de pollastre són les plomes de pollastre (PIP) que cal gestionar com a residus seguint el reglament europeu.

La producció anual de plomes de pollastre és pot fixar per sobre de les 8.500 tones anuals i la major part d'elles van a l'abocador o s'incineren, tot i que una petita part s'hidrolitza per produir pinso animal que té un baix nivell nutricional (Cornell, 2007; Demir et al., 2015; FUNDACION CIDETEC, 2020; Starón et al., 2017). És en aquest punt on es planteja la valorització d'aquest residu. S'han proposat diferents alternatives com l'ús com a fibres de reforç en material compòsits, com a biosorbents, com a barreres d'absorció del so, o en la indústria paperera per posar-ne alguns exemples (Barone et al., 2005; Casadesús et al., 2019; Dudyński et al., 2012; Huda & Yang, 2009; Özmen & Baba, 2017; Reddy et al., 2014; Solís-Moreno et al., 2021; Tesfaye et al., 2017).

Pel que fa a la seva utilització en materials compòsits, aquests poden ser molt variats tant pel que fa a la matriu utilitzada com en la manera d'aplicar les plomes al material. Per tant, cal estudiar la viabilitat tècnica i els impactes ambientals associats per cada material abans de fer-ne cap aplicació comercial.

A partir d'aquestes premisses, s'ha procedit a estudiar la valorització de les plomes estabilitzades i triturades per ser utilitzades com a reforç d'un material compòsit fet amb PLA que és un plàstic biodegradable àmpliament utilitzat per la indústria. La producció d'aquest material compòsit pot implicar la valorització d'un residu que actualment no s'aprofita i l'obtenció d'un material biodegradable d'utilitat per a la nostra societat amb un menor impacte ambiental.

1.2. Objectiu de la recerca

Així doncs, l'objectiu principal d'aquesta tesi és estudiar detalladament l'impacte ambiental de la producció d'un material compòsit fet amb PLA i PIP. Com és sabut l'impacte ambiental d'un material depèn, entre altres paràmetres, del procés de producció.

Així doncs l'objectiu principal es pot concretar en diferents subobjectius com:

- Analitzar el millor procés d'estabilització de les plomes de pollastre des del punt de vista tècnic i ambiental.
- Definir les condicions òptimes de producció del material compòsit (PLA/PIP) a partir de l'estudi de diferents propietats del material.
- Estudiar les variacions de les propietats del material en funció del percentatge de PIP que conté.
- Aplicar la metodologia de l'anàlisi de cicle de vida al material compòsit (PLA/PIP).
- Identificar les etapes i els processos amb major impacte en la producció del material compòsit.
- Avaluar la influència de la producció de la carn de pollastre en l'impacte del material.
- Posar aquestes dades a l'abast de la comunitat científica per estudis posteriors d'impacte ambiental de productes amb aquest material.

1.3. Estructura de la tesi

Per aconseguir aquests objectius la tesi s'ha estructurat en 7 capítols que es presenten de forma esquemàtica a la Figura 1-1:

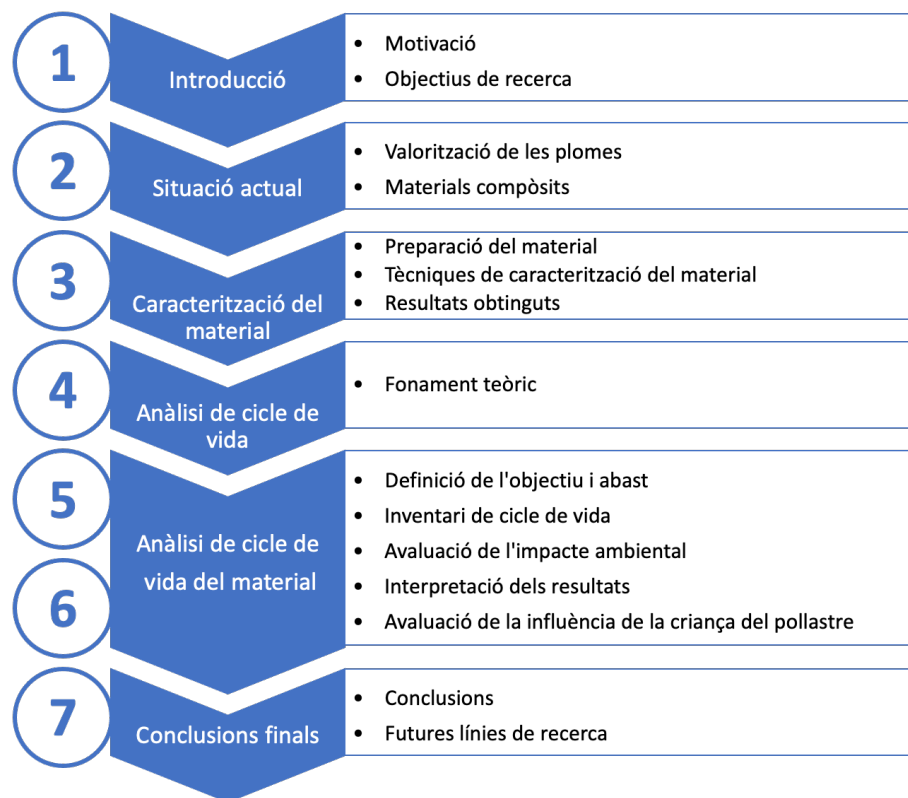


Figura 1-1: Estructura de la tesi

En aquest capítol s'expliquen la motivació i els objectius de la tesi.

Al **capítol 2** es fa una revisió bibliogràfica dels estudis fets sobre la valorització de les plomes de pollastre i dels materials compòsits amb fibres naturals.

Al **capítol 3** s'hi ha inclòs tots els estudis relacionats amb les propietats mecàniques i optimització de producció del material compòsit. El contingut d'aquest article ha estat publicat a la revista *Journal of Composite Materials*:

Properties and optimal manufacturing conditions of chicken feathers/poly(lactic acid) biocomposites; Cañavate, J., Aymerich, J., Garrido, N., Colom, X., Macanás, J., Molins, G., Álvarez, M. D., & Carrillo, F. (2015); *Journal of Composite Materials*, 50(12); <https://doi.org/10.1177/0021998315595534>

Al **capítol 4** es fa una descripció detallada de la metodologia de l'anàlisi de cycle de vida, que és l'eina que s'utilitzarà per tal de fer l'estudi d'impacte ambiental del producte.

Als capítols 5 i 6 s'aplica l'ACV al material compost fet l'inventari d'entrades i sortides del sistema i la posterior avaluació de l'impacte i interpretació dels resultats. En el capítol 6 també s'inclou la influència que tindria la cria del pollastre en l'impacte del material. Part del contingut d'aquests capítols ha estat publicat a (Molins et al., 2018):

Environmental Impact Assessment of Polylactide (PLA)/Chicken Feathers Biocomposite Materials; Molins, G., Álvarez, M. D., Garrido, N., Macanás, J., & Carrillo, F. (2018); *Journal of Polymers and the Environment*, 26(3); <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0982-9>

Al capítol 7 es presenten les conclusions obtingudes a aquesta tesi i les idees per a possibles línies d'investigació futures.

1.4. Bibliografia

- Banc Mundial. (2019, May 21). *Global trends in raw materials consumption*.
<https://documentos.bancomundial.org/es/publication/documents-reports/documentdetail/234921468739201136/global-trends-in-raw-materials-consumption>
- Barone, J., Schmidt, W., & Liebner, C. (2005). Compounding and molding of polyethylene composites reinforced with keratin feather fiber. *Composites Science and Technology*, 65(3–4), 683–692.
- Brundtland, G. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. *Oxford Paperbacks, Report of*.
- Cañavate, J., Aymerich, J., Garrido, N., Colom, X., Macanás, J., Molins, G., Álvarez, M. D., & Carrillo, F. (2015). Properties and optimal manufacturing conditions of chicken feathers/poly(lactic acid) biocomposites. *Journal of Composite Materials*, 50(12).
<https://doi.org/10.1177/0021998315595534>
- Casadesús, M., Álvarez, M. D., Garrido, N., Molins, G., Macanás, J., Colom, X., Cañavate, J., & Carrillo, F. (2019). Environmental impact assessment of sound absorbing nonwovens based on chicken feathers waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 149.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.009>
- Comunitat Europea. (2009). *Reglamento CE 1069/2009 por el que se establece las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano y deroga Reglamento (CE) núm 1774/2002, de 3-10-2002 (LCEur 2002\2628 y LCEur 2007\1: Vol. Reglament*. Comunitat Europea.
- Cornell, lab of O. (2007). *Feather structure*. Cornell, lab of Ornithology.

- Demir, T., Hameş, E. E., Öncel, S. S., & Vardar-Sukan, F. (2015). An optimization approach to scale up keratinase production by *Streptomyces* sp. 2M21 by utilizing chicken feather. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *103*. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.025>
- Dudyński, M., Kwiatkowski, K., & Bajer, K. (2012). From feathers to syngas - technologies and devices. *Waste Management*, *32*(4), 685–691. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.017>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2023, March 24). *FAOSTAT-Cultivos y productos de ganadería [online]*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- FUNDACION CIDETEC. (2020). *KaRMA2020: Industrial Feather Waste Valorisation for Sustainable KeRatin based MAterials*. <https://doi.org/10.3030/723268>
- Huda, S., & Yang, Y. (2009). Feather Fiber Reinforced Light-Weight Composites with Good Acoustic Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, *17*(2), 131–142.
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. In *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Molins, G., Álvarez, M. D., Garrido, N., Macanás, J., & Carrillo, F. (2018). Environmental Impact Assessment of Polylactide(PLA)/Chicken Feathers Biocomposite Materials. *Journal of Polymers and the Environment*, *26*(3). <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0982-9>
- Nacions Unides. (2018, August 22). *Objetivos del desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- OECD. (2019). Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences. Highlights. In *Global Material Resources Outlook to 2060*.
- Özmen, U., & Baba, B. O. (2017). Thermal characterization of chicken feather/PLA biocomposites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *129*(1), 347–355. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6188-5>
- Parlamento Europeo. (2022). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Reddy, N., Chen, L., Zhang, Y., & Yang, Y. (2014). Reducing environmental pollution of the textile industry using keratin as alternative sizing agent to poly(vinyl alcohol). *Journal of Cleaner Production*, *65*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.046>
- Ritchie, Hannah; Rose, M. (2017). Meat and Dairy Production. *Our World in Data*.
- Solís-Moreno, C. A., Cervantes-González, E., & Saavedra-Leos, M. Z. (2021). Use and treatment of chicken feathers as a natural adsorbent for the removal of copper in aqueous solution. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *19*(1). <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00639-4>

Staroń, P., Kowalski, Z., Staroń, A., & Banach, M. (2017). Thermal treatment of waste from the meat industry in high scale rotary kiln. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(6). <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1223-9>

Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugemath, D., & Chunilall, V. (2017). Valorisation of chicken feathers: Application in paper production. *Journal of Cleaner Production*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.034>

2. Situació actual de la valorització de plomes de pollastre i dels materials compòsits amb fibres naturals

Degut a que aquesta tesi és un estudi multidisciplinari on s'engloben diversos aspectes, l'estudi de la situació actual de les diferents disciplines estudiades es farà en 3 grans blocs. En aquest capítol es parlarà de les plomes de pollastre i les fibres de queratina per continuar parlant dels materials compòsits termoplàstics amb fibres naturals. La base teòrica de les propietats del material s'exposarà al capítol 3 dedicat completament a aquests aspectes i els fonaments de l'ACV s'explicaran al capítol 4.

2.1. Valorització de les plomes de pollastre

2.1.1. Plomes i fibres de queratina

Segons el diccionari de l'Enciclopèdia Catalana les plomes són cadascuna de les excrescències còrnies de la pell dels ocells, formades de queratina, més o menys

mineralitzada, que consten d'un canó fixat a la pell, que s'allarga en el raquis, a cada costat del qual hi ha les barbes.

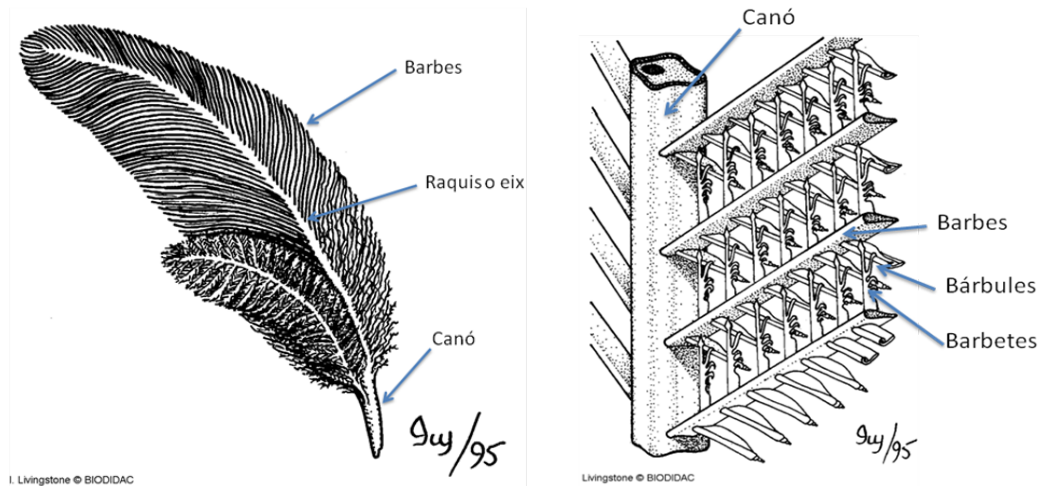


Figura 2-1: Estructura d'una ploma. Font: (Biodidac)

L'estructura de les plomes és molt complexa degut a la gran quantitat d'elements que la formen. A la Figura 2-1 es mostra l'estructura simplificada d'una ploma. Aquesta consta d'una part central, el raquis, més rígida que serveix d'eix per la resta de l'estructura. El raquis té l'aspecte d'una canya buida i, tot i ser molt lleuger, proporciona la rigidesa necessària a la ploma per suportar la resta de l'estructura (Casadesús, 2010). La part inferior del raquis, la més propera al cos de l'au, s'anomena canó i és més ampla, buida i nua. El canó es troba acoblat a la pell.

Del raquis en surten perpendicularment unes làmines fines i rectes anomenades barbes. De les barbes en surten les bàrbules, que formen una xarxa complicada de filaments entrelaçats que donen la textura d'un teixit molt lleuger amb capacitat de suportar una càrrega pesada per unitat d'àrea. Gràcies a aquesta propietat les aus poden volar.

Concretant en les plomes de pollastre s'observa que tenen una sèrie de propietats úniques - baixa densitat i bones propietats com aïllants tèrmics i acústics, per exemple - que fan pensar en elles com a alternatives viables a una sèrie d'aplicacions diferents al seu ús com a hidrolitzats o a la seva disposició com a residus en abocadors, plantes de compostatge o plantes de valorització energètica (Cornell, 2007; Tesfaye et al., 2017).

Aquestes propietats vénen donades en gran mesura per la queratina que contenen les plomes (al voltant del 90%) fent que siguin uns dels residus queratinosos més abundants de la naturalesa (Coello et al., 2003; Kock, 2006).

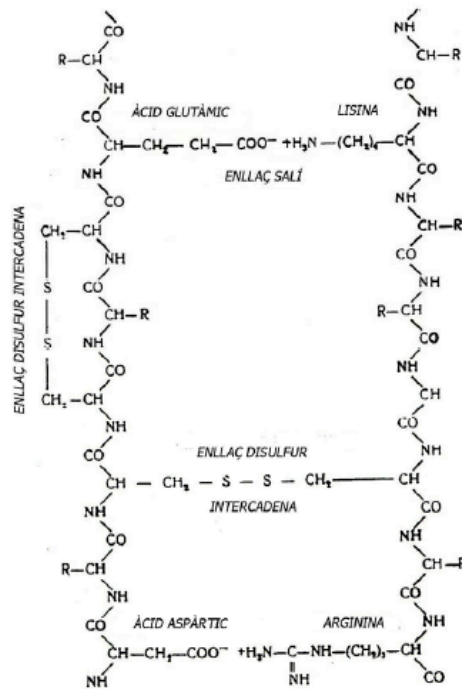


Figura 2-2: Estructura de la queratina. Font (Biodidac, n.d.)

La queratina és una proteïna característica dels mamífers i les aus que es pot trobar a moltes estructures orgàniques com les plomes, la llana, el pèl, les ungles, les banyes o les urpes. La seva funció bàsica és la de protecció de l'epidermis enfront de les alteracions ambientals. Es tracta d'una proteïna duradora, insoluble en aigua, poc reactiva i flexible. La seva estabilitat és deguda als ponts d'hidrogen i a les forces de van der Waals, però sobretot al seu elevat contingut en l'aminoàcid cisteïna (al voltant del 7% en funció de l'estructura) que permet establir ponts disulfur (Barone & Schmidt, 2006; Martinez-Hernandez et al., 2005).

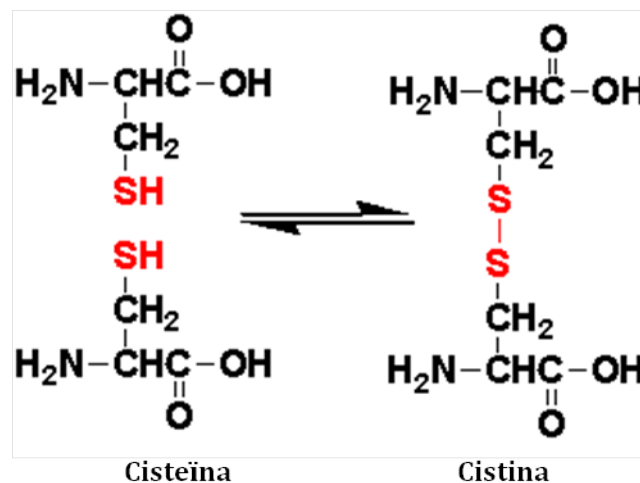


Figura 2-3: Estructura de la cisteïna i de la cistina. Font (Yruela Guerrero & Sebastián Yagüe, 2014)

És una proteïna caracteritzada per un elevat pes molecular i per una mida de l'ordre de 10 a 100 nm (J. Barone & Schmidt, 2006). L'elevat percentatge de cisteïna a la seva estructura possibilita la formació dels ponts disulfur, tant intermoleculars com intramoleculars, que són els responsables de l'elevada resistència i rigidesa de la queratina. La queratina té un 40% dels aminoàcids amb grups hidrofílics i un 60 % amb grups hidrofòbics a la seva estructura (J. Barone & Schmidt, 2006). Les estructures queratíniques (plomes, llana o ungles) són molt diverses perquè tenen seqüències d'aminoàcids diferents que generen morfologies diferents a nivell macroscòpic. Això fa que les seves propietats superficials depenguin de quins aminoàcids estan a la part interna o externa de la superfície (Wallenberger & Weston, 2004).

En el cas de les plomes avians s'ha identificat una seqüència de 95 aminoàcids comuna a la majoria d'elles. En aquesta estructura hi trobem una elevada presència d'aminoàcids com la cisteïna (Cys), serina (Ser), prolina (Pro), glicina (Gly), valina (Val) o leucina (Leu). En canvi hi ha una presència molt baixa de aspartat (Asn), glutamina (Glu), treonina (Thr) o arginina (Arg) (Wallenberger & Weston, 2004). Aquesta seqüència d'aminoàcids es pot orientar en forma d'hèlix alfa, full beta o una macroestructura arbitrària (random coil) (Figura 2-4). Les proporcions d'aquestes estructures a les fibres de queratina procedents de plomes són d'un 41% d'hèlix alfa, un 38% de full beta i un 21% d'estructures arbitràries (desordenades) (J. Barone & Schmidt, 2006). Aquestes diferències en l'empaquetament de les fibres determinen l'estructura microcristal·lina i per tant les característiques macroscòpiques del material observant-se parts de les plomes

clarament diferenciades com són el raquis (majoritàriament full beta) o les barbes de la ploma (majoritàriament α -hèlix) (Wallenberger & Weston, 2004).

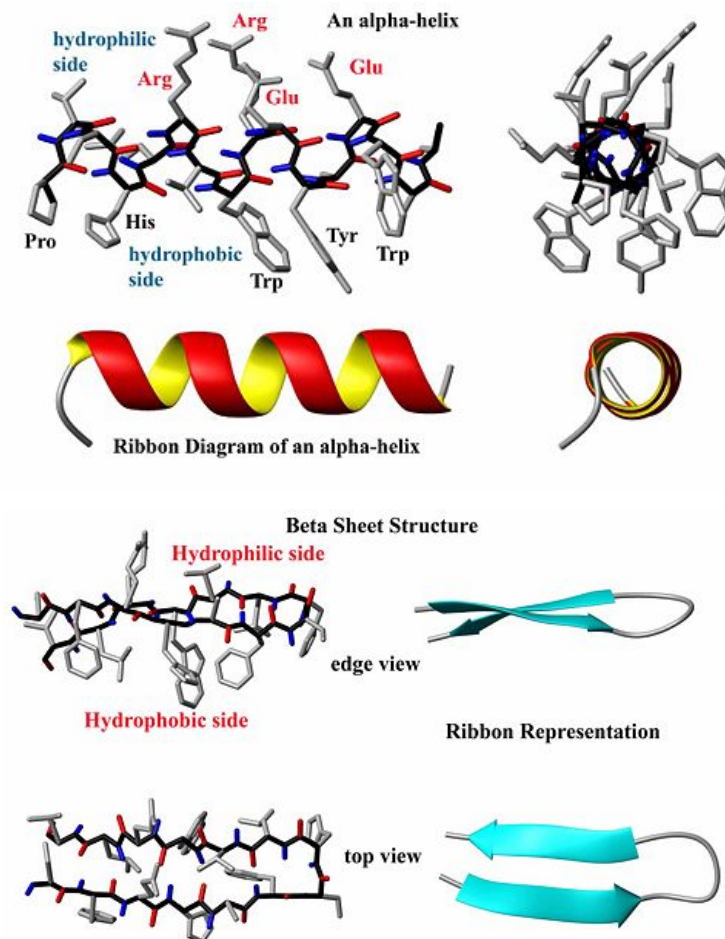


Figura 2-4: Estructures hèlix alfa i full beta. (The Citizens Compendium, 2010)

Aquestes estructures són les responsables de moltes de les característiques de les fibres de queratina com la duresa, l'elevat rati longitud/diàmetre, l'hidrofobicitat o la morfologia altament organitzada. Això fa que tinguin unes propietats - baixa densitat, biodegradabilitat, bones propietats com aïllants tèrmics i acústics i fàcil processabilitat donada la no abrasivitat d'aquest material – que en permeten l'exploració industrial per al desenvolupament de diverses aplicacions que poden representar una alternativa viable als seus usos actuals com la recuperació energètica o l'alimentació animal (Cornell, 2007; Tesfaye et al., 2017). Tampoc es pot oblidar el seu baix cost - les plomes actualment no tenen cap valor al mercat - i el fet de provenir d'una font renovable constant, que no està sotmesa a l'estacionalitat i generada a tot el planeta (Martinez-Hernandez et al., 2005).

Com ja s'ha dit anteriorment, les plomes de pollastre són considerades SANDACH i el seu ús i tractaments estan regulats pel Reglament Europeu 1069/2009 que estableix les normes sanitàries aplicables als SANDACHs i els productes derivats (Comunitat Europea, 2009). L'objectiu d'aquest reglament és reduir al mínim els riscos per a la salut pública que puguin ocasionar aquest tipus de subproductes animals. Aquest reglament i les seves disposicions d'aplicació regulen els usos i les vies d'eliminació de les PIP per tal de garantir-ne la seguretat sanitària (Comunitat Europea, 2011; Ministerio de la presidencia, 2012). D'aquesta manera s'explicita que les plomes poden ser utilitzades en diferents sectors i reduir els costos econòmics i ambientals de la seva eliminació, sempre que se'n minimitzin els riscos sanitaris.

Segons l'article 10 del reglament 1069/2009 les plomes són material de categoria 3. Això implica (Figura 2-5) que poden ser eliminades per incineració, co-incineració o dipositades en abocador autoritzat. Les vies de valorització de les plomes són la seva utilització per a la fabricació de pinsos o aliments crus per animals de companyia, el compostatge, l'ús com a combustible o la fabricació de productes derivats.

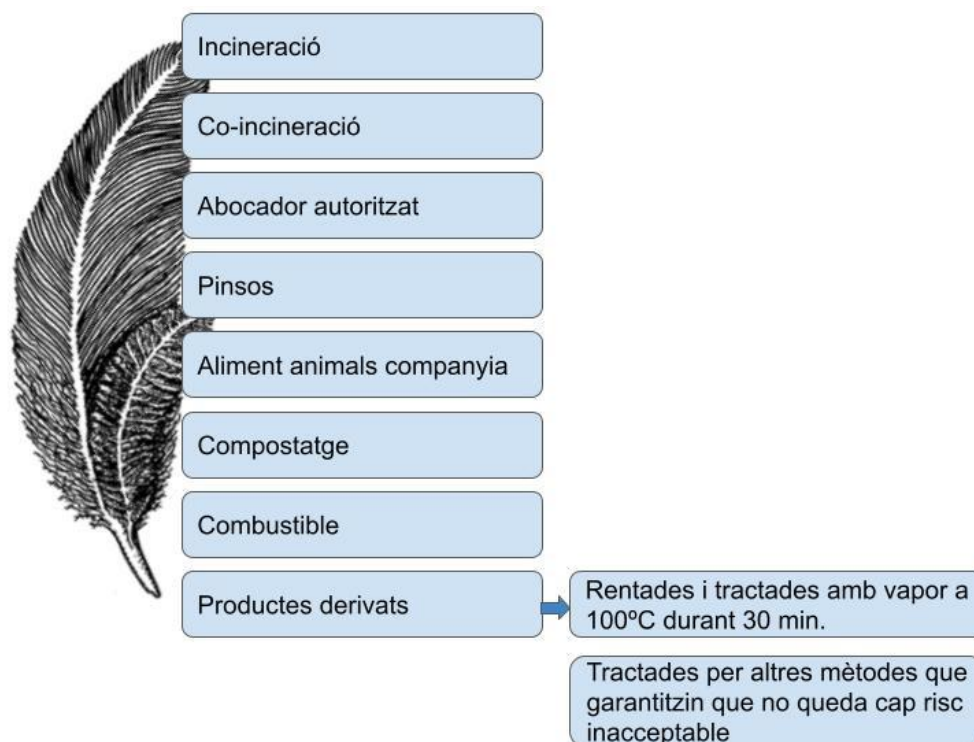


Figura 2-5: Vies d'eliminació i tractament de les plomes de pollastre. Elaboració pròpia a partir de reglament SANDACH.

En el cas d'optar per la fabricació de productes derivats cal fer un tractament que les converteixi en plomes transformades. Segons el reglament SANDACH, les plomes transformades són aquelles que han estat tractades amb una corrent de vapor a 100°C durant 30 minuts o amb un altre mètode que garanteixi l'eliminació de tot risc inacceptable i que estiguin seques i en envasos tancats (Comunitat Europea, 2011).

Les plomes, a part de ser un subproducte animal, també són considerades un residu i s'han d'eliminar, tractar o valoritzar tal i com diu la legislació de residus. En aquest cas, segons el Catàleg de Residus de Catalunya (CRC) i el llistat de residus espanyol i europeu les plomes estan classificades amb el codi 020102 (Residus de teixits animals). És un residu no perillós i, segons les recomanacions que s'especifiquen per aquest residu al CRC, una de les vies de recuperació que s'especifiquen amb prioritat 1 és la R0306 que correspon al reciclatge de residus orgànics per la posterior fabricació o producció de nous productes. Cal destacar que la classificació de les plomes com a residus de teixits animals fa que es recullin conjuntament amb altres restes animals de l'escorxador. Aquest fet fa que no hi hagi dades concretes de la quantitat de PIP que es generen a Catalunya i que en el procés d'estabilització calgui tenir en compte l'eliminació de les restes animals que porten les plomes.

Tot i que la normativa SANDACH proposa un mètode d'estabilització per les PIP (tractament amb vapor d'aigua), també dona l'opció d'utilitzar-ne d'altres sempre que es garanteixi l'eliminació dels riscos associats a les PIP. En aquest sentit, l'any 1998 Gassner va patentar (Gassner et al., 1998) un procés per a l'obtenció de fibres de queratina a partir de PIP de l'escorxador. Aquest procés de rentat de les plomes implica millores ambientals com la valorització dels residus del procés aviar.

Aquest procés consta de 5 passos bàsics: recol·lecció de les plomes, rentat amb dissolvent orgànic, repetició del rentat, assecat i extracció de les fibres del canó de les plomes.

Com es pot observar a la Figura 2-6 el primer rentat té com a objectiu treure greixos i olis, esterilitzar i deshidratar parcialment les fibres. Es tracta d'un rentat amb agitació en un dissolvent orgànic polar durant 1 hora. El segon rentat pretén extreure les proteïnes solubles i acabar d'esterilitzar les plomes. Així es torna a rentar amb un dissolvent orgànic o un agent bactericida durant 1 hora. Posteriorment cal assecar les plomes en una estufa entre 60 i 120 °C.

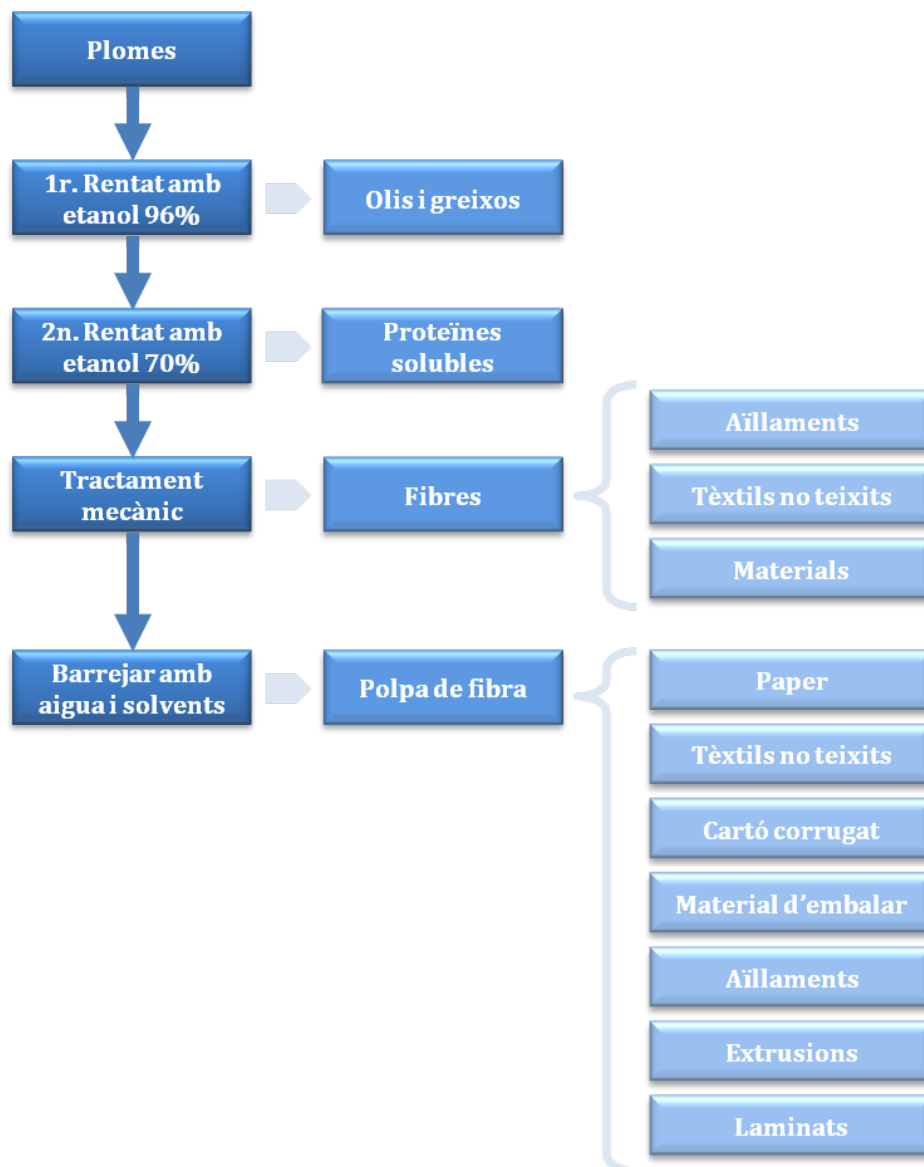


Figura 2-6: Rentat de les plomes segons (Gassner et al., 1998).

Un cop seques s'extreuen les fibres del canó a través d'un desfibrat mecànic. El tipus de desfibrat determinarà la longitud de les fibres, la mida i la distribució de les partícules. Així podem obtenir fibres llargues (2.5 cm) o bé més curtes (<1.5 cm). L'ús final que li vulguem donar al producte serà el que definirà el tipus de separació. Cal tenir en compte que la presència de material del canó a la barreja dóna lloc a un material més granular, voluminós i lleuger. En canvi la seva absència porta a productes més llisos i densos.

Una alternativa al tractament amb dissolvent orgànic polar seria un tractament amb un reactiu oxidant (pe. H_2O_2). A partir d'aquí les fibres ja es poden utilitzar o poder seguir tractant-se per obtenir polpa per altres aplicacions, com productes de paper, materials

corrugats o fibres i adsorbents (Clark, 1978; “Dictionary of Converting,” 1992; Smook, G, 1989).

Posteriorment, a l'any 2000, el mateix Gassner va tornar a patentar una millora del processat de les plomes (Gassner, 2000). Aquestes millores impliquen l'acceptació de plomes o una barreja de plomes amb altres parts de l'aviram, l'eliminació de la separació manual o mecànica de les altres parts dels residus aviaris per tenir plomes soles, un sol rentat amb un dissolvent polar orgànic soluble en aigua, una menor quantitat de dissolvents extractius, una millora en l'eficiència energètica i una millor recuperació dels olis i les proteïnes. Aquest nou procés és car i difícil i les patents posteriors de producció de productes polimèrics o compòsits utilitzen la primera patent de Gassner de l'any 1998 (J. R. Barone & Schmidt, 2006; J. Barone & Schmidt, 2005b).

2.2. Materials compòsits amb fibres naturals

Un material compòsit és un sistema de materials constituït per una mescla o combinació de dos o més micro o macro constituents que difereixen en forma i composició química i que són essencialment insolubles entre si (Smith, 2004). Aquest tipus de materials permeten obtenir un nou material amb propietats diferents a la dels materials per separat que milloren les seves prestacions (Wallenberger & Weston, 2004). Això fa que estiguin molt presents al nostre entorn en articles com les guitarres, les raquetes de tennis, els cotxes, els avions, els components electrònics, i moltes altres aplicacions (Mohanty et al., 2000).

Els materials compòsits estan formats per un matriu definida (metàl·lica, polimèrica o ceràmica) reforçada amb fibres o partícules. En el cas de matrius polimèriques, en general, tenen un origen petroquímic i no són biodegradables, tot i que actualment també s'han proposat l'ús de matrius biodegradables tant d'origen natural (p.e. poliàcid làctic (PLA)) com petroquímic (p.e. policaprolactona (PCL)) (Bajpai et al., 2014; Hinchcliffe et al., 2016; Ochi, 2008; Raj et al., 2019; Rytlewski et al., 2018). Les fibres de reforç per aquests tipus de matriu poden ser sintètiques (fibra de vidre, carboni o aràmida), naturals (fibres de cel·lulosa com el jute, sisal, lli, cànem, kenaf, fusta, o fibres animals com la queratina o la llana) i/o d'altres components inorgànics (talc o sílice) (J. Barone &

Schmidt, 2005c). Aquestes fibres de reforç milloren la força i la rigidesa de les estructures de la matriu.

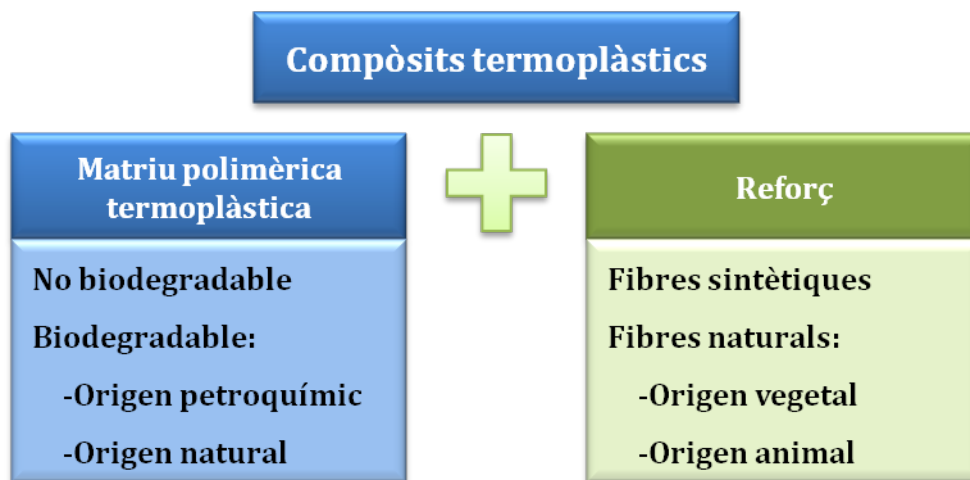


Figura 2-7: Esquema dels possibles materials composts de matriu polimèrica.

Així doncs els composts polimèrics termoplàstics estan formats per matrius polimèriques d'origen no renovable (majoritàriament polietilè (PE), polipropilè (PP) i el poliestirè (PS)) i fibres sintètiques com la fibra de vidre, d'aramida i de carboni (Baillie, 2004). Aquests materials polimèrics presenten una bona resistència mecànica, però tenen un impacte ambiental elevat: pràcticament no són biodegradables, tenen un elevat cost econòmic i energètic, consumeixen recursos fòssils i són difícils de reciclar (La Rosa et al., 2014). Això ha fet que, en gran part, a partir dels 1990s es plantegin alternatives viables tant des del punt de vista ambiental com econòmic.

Així la investigació en materials composts ha desenvolupat noves idees aplicant fibres de reforç d'origen natural (per exemple lli, cànem, rami, queratina) a matrius biopolimèriques fetes a partir de cel·lulosa, midó o àcid làctic (Wool & Hong, 2005). Aquests materials, anomenats biocompostos, encara s'estan desenvolupant avui en dia. Com que els dos components del biocompost són biodegradables, el material que obtenim, en principi, també ho és. Aquesta biodegradabilitat és la gran avantatge d'aquests materials encara que en molts casos no s'aconsegueixen les propietats tèrmiques i mecàniques desitjables per a determinades aplicacions industrials. Cal remarcar que les matrius biodegradables poden ser de fonts renovables, com el PLA, o de fonts no renovables com la PCL.

Les fibres de reforç d'origen vegetal (lli, bambo o kenaf) han estat molt estudiades i actualment ja són una alternativa vàlida per a determinades aplicacions industrials en front de materials compòsits fets amb fibra de vidre. Podem trobar-les en productes tant comuns com els marcs de les portes i les finestres dels edificis, els panells dels cotxes, els respatllers, les safates dels maleters dels automòbils, les joguines, el mobiliari, les eines de jardineria o els bioembalatges (Baillie, 2004; Mohanty et al., 2000; Wotzel et al., 1999; Xu et al., 2008).

De totes maneres les fibres d'origen natural deriven de plantes que estan disponibles de forma estacional en una zona concreta del planeta, es degraden ràpidament i poden suposar una competència amb la cadena alimentària al destinar terres de cultiu a generar aquestes fibres enlloc de destinar-les a la cadena d'alimentació humana (Mohanty et al., 2000; Xu et al., 2008).

A partir d'aquesta premissa es proposa utilitzar plomes de pollastre en lloc d'aquestes fibres pel fet que són un subproducte sense valor de la producció de carn de pollastre, abundant (representa aproximadament un 7% del pes del pollastre viu), no sotmès a l'estacionalitat, produït a tot el planeta, amb una baixa densitat, i bones propietats tèrmiques i acústiques (Ministerio de Agricultura, 2007). Atenent a la producció mundial de carn de pollastre, hi ha un excedent superior a 12 milions de tones anuals per ser valoritzades.

A data d'avui l'ús de PIP com a material de reforç en compòsits està en fase d'investigació i té poques aplicacions al mercat. Si es fa una revisió bibliogràfica, es pot observar que hi ha estudis centrats en la combinació de plomes de pollastre amb materials termoplàstics com el polietilè o el polipropilè i amb materials termostables com les resines epoxi (J. Barone et al., 2005; J. Barone & Schmidt, 2005a, 2006; Bullions et al., 2006; Carrillo, Rahhali, Cañavate, et al., 2013; Colom et al., 2015; Reddy & Yang, 2010). Aquests materials permeten una valorització de les plomes de pollastre per fer un material nou que no tindrà possibilitats de ser valoritzat fàcilment, ja que no és un material 100% biodegradable i la mescla de diferents materials en dificulta el reciclatge. En aquesta direcció es proposa utilitzar fibres de reforç biodegradables combinades amb una matriu biodegradable com pot ser el poliàcid làctic (PLA).

Totes aquestes propostes de materials compòsits són estudiades majoritàriament des del punt de vista de la seva viabilitat tècnica, però també és important mirar sí són una

alternativa viable des del punt de vista ambiental, ja que el principal objectiu de l'economia circular és minimitzar l'impacte ambiental de processos, productes i serveis minimitzant el consum de recursos i la generació de residus (Bajpai et al., 2014; Raj et al., 2019; Vilaplana et al., 2010).

En l'impacte ambiental dels materials compòsits no hi ha una unanimitat pel que fa a que els materials reforçats amb fibres naturals tinguin un menor impacte respecte als reforçats amb fibres sintètiques. En diferents casos el major o menor impacte del material està associat a l'ús que se'n farà del material degut, en general, a la seva menor densitat, però també hi ha estudis que certifiquen un menor impacte ambiental dels materials amb fibres naturals (Baillie, 2004; Corbiere-Nicollier et al., 2001; Joshi et al., 2004; Wotzel et al., 1999; Xu et al., 2008). Com es pot comprovar amb aquests estudis d'ACV la major part són sobre polímers amb fibres naturals vegetals, hi ha molt pocs estudis sobre fibres naturals animals com les PIP.

En el cas dels impactes ambientals d'un material és molt important analitzar tot el procés de producció des de l'obtenció de les matèries primeres fins a l'obtenció del material, és per aquest motiu que cal analitzar l'impacte per cada material nou que es proposi o per cada millora tècnica o productiva que s'introdueixi al procés d'obtenció del material.

2.3. Bibliografia

- Baillie, C. (2004). *Green Composites, Polymer composites and the environment*. Woodhead Publishing Ltd.
- Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. (2014). Development and characterization of PLA-based green composites: A review. In *Journal of Thermoplastic Composite Materials* (Vol. 27, Issue 1). <https://doi.org/10.1177/0892705712439571>
- Barone, J. R., & Schmidt, W. F. (2006). *Compositions and films comprised of avian feather keratin*. Google Patents. <http://www.google.co.in/patents/EP1732987A2?cl=en>
- Barone, J., & Schmidt, W. (2005a). Polyethylene reinforced with keratin fibers obtained from chicken feathers. *Composites Science and Technology*, 65(2), 173–181.
- Barone, J., & Schmidt, W. (2005b). *Polymer composites containig keratin: Vol. 10/750,464*.
- Barone, J., & Schmidt, W. (2005c). *Polymer composites containing keratin*. Google Patents. <http://www.google.com/patents/US20050148703>

- Barone, J., & Schmidt, W. (2006). *Composites and films comprised of avian feather keratin: Vol. 10/805,558*.
- Barone, J., Schmidt, W., & Liebner, C. (2005). Compounding and molding of polyethylene composites reinforced with keratin feather fiber. *Composites Science and Technology*, 65(3–4), 683–692.
- Biodidac. (n.d.). *biodidac.bio.uootawa.ca*.
- Bullions, T. A., Hoffman, D., Gillespie, R. A., Price-O'Brien, J., & Loos, A. C. (2006). Contributions of feather fibers and various cellulose fibers to the mechanical properties of polypropylene matrix composites. *Composites Science and Technology*, 66(1), 102–114.
- Carrillo, F., Rahhali, A., Cañavate, J., & Colom, X. (2013). Biocomposites using waste whole chicken feathers and thermoplastic matrices. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(19), 1419–1429. <https://doi.org/10.1177/0731684413500546>
- Casadesús, M. (2010). *Preparació i caracterització d'un residu biodegradable per a la biosorció d'espècies contaminants: Vol. PFC*.
- Clark, J. A. (1978). *Pulp Technology and Treatment for Paper. Miller Freeman Publications*.
- Coello, N., Bertch, C., Estrada, O., Moccó, Y., & Hasegawa, M. (2003). Las plumas como residuo agroindustrial: su utilización biotecnológica para producir insumos de interés industrial. *Revista de La Facultad de Ingeniería de La U.C.V.*, 18(3), 119.
- Colom, X., Rahalli, A., Cañavate, J., & Carrillo, F. (2015). Properties and optimal manufacturing conditions of chicken feathers thermoplastic biocomposites. *Journal of Composite Materials*, 49(3). <https://doi.org/10.1177/0021998313518569>
- Comunitat Europea. (2009). *Reglamento CE 1069/2009 por el que se establece las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano y deroga Reglamento (CE) núm 1774/2002, de 3-10-2002 (LCEur 2002\2628 y LCEur 2007\1: Vol. Reglament. Comunitat Europea*.
- Comunitat Europea. (2011). *Reglamento 142/2011 disposiciones de aplicacion reglamento 1069/2009 SANDACH. Comunitat Europea*.
- Corbiere-Nicollier, T., Gfeller-Laban, B., Lundquist, L., Leterrier, Y., Manson, J., & Jolliet, O. (2001). Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics. *Resources, Conservation, and Recycling*, 33(4), 267–287.
- Cornell, lab of O. (2007). *Feather structure. Cornell, lab of Ornithology*.
- Dictionary of Converting. (1992). In *Dictionary of Converting*. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2266-5>
- Gassner, G. (2000). *Conversion of avian feathers-waste stream to useful products: Vol. 09/266,820*.

- Gassner, G., Schimdt, W., Line, M., Thomas, C., & Walters, R. (1998). *Fiber and fiber products produced from feathers: Vol. 471,349*.
- Hinchcliffe, S. A., Hess, K. M., & Srubar, W. V. (2016). Experimental and theoretical investigation of prestressed natural fiber-reinforced polylactic acid (PLA) composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.089>
- Joshi, S., Drzal, L., Mohanty, A., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? In *Composites. Part A, Applied science and manufacturing* (Vol. 35, Issue 3, pp. 371–376). Elsevier.
- Kock, J. (2006). *Physical and mechanical properties of chiquen feather materials: Vol. PhD*.
- La Rosa, A. D., Recca, G., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., & Cicala, G. (2014). Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.017>
- Martinez-Hernandez, A., Velasco-Santos, C., de Icaza, M., & Castano, V. (2005). Mechanical properties evaluation of new composites with protein biofibers reinforcing poly(methyl methacrylate). *Polymer*, 46(19), 8233–8238.
- Ministerio de la presidencia. (2012). *Real Decreto 1528/2012, de 8 de noviembre, por el que se establecen las normas aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano*. Boletín Oficial del Estado.
- Ministerio de Agricultura, P. y A. (2007). *Libro blanco subproductos de origen animal no destinados al consumo humano*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Mohanty, A., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 276(3–4), 1–24.
- Ochi, S. (2008). Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials*, 40(4–5). <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2007.10.006>
- Raj, S. S., Kannan, T. K., Babu, M., & Vairavel, M. (2019). Processing and testing parameters of PLA reinforced with natural plant fiber composite materials - A brief review. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9.
- Reddy, N., & Yang, Y. (2010). Light-weight polypropylene composites reinforced with whole chicken feathers. *Journal of Applied Polymer Science*, NA-NA. <https://doi.org/10.1002/app.31931>
- Rytlewski, P., Stepczyńska, M., Moraczewski, K., Malinowski, R., Jagodziński, B., & Żenkiewicz, M. (2018). Mechanical properties and biodegradability of flax fiber-reinforced composite of polylactide and polycaprolactone. *Polimery/Polymers*, 63(9). <https://doi.org/10.14314/polimery.2018.9.4>
- Smith, W. F. (2004). *Ciencia e ingeniería de materiales: Vol. 3ª*. McGraw-Hill.
- Smook, G. A. (1989). Handbook for Pulp and Paper Technologists. In *Tappi Press*.

- The Citizens Compendium*. (2010, February 11). http://en.citizendium.org/wiki/protein_structure
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D., & Chunilall, V. (2017). Valorisation of chicken feathers: Application in paper production. *Journal of Cleaner Production*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.034>
- Vilaplana, F., Strömberg, E., & Karlsson, S. (2010). Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 95(11), 2147–2161.
- Wallenberger, F., & Weston, N. (2004). *Natural fibers, plastics and composites* (Vol. 1). Kluwer Academic Publishers.
- Wool, R., & Hong, C. (2005). Development of a bio-based composite material from soybean oil and keratin fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 95(6), 1524. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/109876070/abstract>
- Wotzel, K., Wirth, R., & Flake, M. (1999). Life cycle studies on hemp fibre reinforced components and ABS for automotive parts. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 272, 121–127.
- Xu, X., Jayaraman, K., Morin, C., & Pecqueux, N. (2008). Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1–3), 168–177.
- Yruela Guerrero, I., & Sebastián Yagüe, Á. (2014). Macromoléculas biológicas: proteínas, DNA y RNA. In *Bioinformática con Ñ* (pp. 185–209). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1067867>

3. Caracterització del material compòsit de plomes de pollastre i poliàcid làctic

Com ja s'ha dit al capítol 2, els materials compòsits de PLA amb plomes de pollastre poden ser una alternativa per aconseguir materials plàstics biodegradables més respectuosos amb el medi ambient. De totes maneres cal tenir en compte que aquests materials han de complir uns mínims requeriments tècnics que els facin viables i que hi ha diferents paràmetres de producció que poden influenciar el seu comportament (Hull, 1983). L'impacte dels materials depèn, en part, del procés de producció i aquest pot ser determinant en les propietats mecàniques i el comportament del material, per tant abans de començar a avaluar l'impacte ambiental cal fixar les condicions de producció per tal d'obtenir un material amb les propietats desitjades. Per aquest motiu s'ha procedit a estudiar l'efecte de les condicions de producció sobre les propietats mecàniques, el comportament general del compòsit i la compatibilitat entre la fibra i la matriu. Aquest últim és un factor important relacionat amb les propietats macroscòpiques finals del material (Bullions et al., 2004). És important remarcar que la compatibilitat fibra matriu és preveu que sigui diferent en les PIP respecte a d'altres fibres com les cel·lulòsiques ja que aquestes últimes són majoritàriament hidrofíliques, mentre que les plomes de pollastre estan fetes de queratina que és una proteïna amb aminoàcids hidrofílics i

hidrofòbics amb un rati al voltant de 3:2, que pot aportar avantatges pel que fa a la seva compatibilitat amb les matrius plàstiques (J. Barone & Schmidt, 2005c).

En aquest capítol s'exposa la metodologia per obtenir el material compòsit de PIP i PLA. En primer lloc s'explica com es prepararà el material, després les propietats mecàniques estudiades i finalment s'exposen els resultats en diferents condicions de temperatura, temps i velocitat de mescla. Aquests resultats es comparen amb el material de referència (100% PLA). Per fer aquesta comparació es farà l'estudi de les propietats mecàniques d'una placa de material compòsit amb una composició del 80% de PLA i un 20% de PIP produïda sota diferents condicions de fabricació (indicades al capítol 3.3). Una vegada fixades les condicions de producció, s'ha procedit a l'estudi de les propietats mecàniques i físiques de diferents plaques amb un rang de diferents composicions en % de PIP del compòsit. Per entendre millor el comportament del material i determinar les possibles causes dels canvis en el comportament mecànic de les plaques amb diferents composicions respecte al PLA pur s'han utilitzat tècniques microscòpiques i espectroscòpiques.

3.1. Materials i preparació del compòsit

3.1.1. Àcid polilàctic (PLA)

L'àcid polilàctic ha estat proporcionat per VELOX sota el nom comercial de Biopolymers PLE 5 (GMO-free). És un material transparent, amb un índex de fluïdesa a 190°C d'entre 2 i 5g/10 min i una densitat de 1,25 kg/m³ segons les dades del fabricant. En el moment de processar el material i per tal d'evitar la presència d'aigua al material, el PLA s'ha assecat prèviament a 70°C durant 4 hores en un forn i desat convenientment dins d'un dessecador. D'aquesta manera s'evita l'aparició de bombolles al material final degut a que amb l'augment de temperatura l'aigua del material es converteix en vapor d'aigua. (Veure fitxa tècnica a Annex A).

3.1.2. Plomes de pollastre (PIP)

Les plomes de pollastre són recollides de l'escorxador i en aquest cas concret provenen d'un gestor de residus autoritzat de Catalunya on s'han envasat i transportat en bosses industrials d'uns 15 kg. Aquest residu arriba humit i acompanyat de restes de carn, vísceres i sang del propi pollastre. En aquestes condicions la seva degradació és molt ràpida i es procedeix a la seva congelació immediata tan bon punt arriben al laboratori, d'aquesta manera se'n preserven les propietats i s'impedeix la seva degradació. Quan es volen utilitzar, es descongelen mantenint-les a 4°C durant 12 hores. En el cas de la producció industrial d'aquest material, la congelació no seria necessària ja que les plomes es processarien al moment d'arribar a la planta de processament.

La normativa SANDACH proposa el tractament amb vapor d'aigua com a mètode d'estabilització i transformació de les plomes per ser utilitzades a nivell industrial, però també permet mètodes alternatius. Alguns d'aquests mètodes han estat patentats (Gassner, 2000; Gassner et al., 1998). En aquest treball, per tal d'avaluar les propietats mecàniques del material compost les plomes s'han estabilitzat seguint un tractament amb vapor d'aigua a 135°C durant 20 minuts i un assecat posterior que permet descontaminar les PIP i transformar-les en un material tècnic i segur tal i com demanda la normativa SANDACH sense canviar-ne la composició i l'estructura (Tesfaye et al., 2018). Aquest tractament s'explica detalladament a l'apartat 5.2.1.2 Estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre: tractament amb autoclau.

Una vegada s'ha estabilitzat la ploma, es tritura per obtenir un material amb una mida de partícula homogènia. La descripció d'aquest procés es pot veure a l'apartat 5.2.1.4 Trituració de les plomes de pollastre.

3.1.3. Preparació del material compost

Les PIP estabilitzades i triturades es barregen amb el PLA en una mescladora on es fon primer la matriu de PLA i posteriorment s'afegeixen les PIP (Colom et al., 2013, 2014). La mescla fosa es consolida en una premsa de plats calents formant plaques quadrades de 184 x 184 x 2,2 mm³ que es refreden sota pressió amb aigua freda, tal i com s'exposa a l'apartat 5.2.1.5 Fabricació de la placa de material compost.

Els paràmetres de fabricació del material poden influir en les propietats del material final, per això s'ha estudiat l'efecte de tres paràmetres operacionals (temps de mescla, velocitat de mescla i temperatura) en les seves propietats. La influència d'aquests paràmetres en les propietats físiques, mecàniques i estructurals del material s'ha estudiat de forma acurada a partir d'un disseny d'experiments que ha fixat tres valors experimentals per cada paràmetre, el que implica un total de 28 experiments (27 resultants d'establir tres possibilitats dins de cada paràmetre experimental i una última de la fabricació d'una placa 100% PLA amb codi 28-170-5-50). La Taula 3-1 conté el detall de les condicions de cada un dels experiments tenint en compte les variacions de temperatura (170, 180 i 190°C), de temps de mescla (5, 10 i 15 minuts) i de velocitat de mescla (50, 75 i 100 rpm). També s'ha creat un codi amb 4 valors per les mostres on s'indiquen les condicions de fabricació de la següent manera:

Número correlatiu de mostra – temperatura de treball – temps de mescla – velocitat de mescla

Taula 3-1: Nombre d'experiments i codificació de les mostres.

Temperatura (°C)	Temps (min)	Revolucions (rpm)	Codi de la mostra
170	5	50	1-170-5-50
		75	2-170-5-75
		100	3-170-5-100
	10	50	4-170-10-50
		75	5-170-10-75
		100	6-170-10-100
	15	50	7-170-15-50
		75	8-170-15-75
		100	9-170-15-100
180	5	50	10-180-5-50
		75	11-180-5-75
		100	12-180-5-100
	10	50	13-180-10-50
		75	14-180-10-75

Temperatura (°C)	Temps (min)	Revolucions (rpm)	Codi de la mostra
	15	100	15-180-10-100
		50	16-180-15-50
		75	17-180-15-75
		100	18-180-15-100
190	5	50	19-190-5-50
		75	20-190-5-75
		100	21-190-5-100
	10	50	22-190-10-50
		75	23-190-10-75
		100	24-190-10-100
	15	50	25-190-15-50
		75	26-190-15-75
		100	27-190-15-100
170	5	50	28-170-5-50

Tots aquests experiments s'han portat a terme amb plaques de composició del 20% de pomes de pollastre (v/v). Aquesta composició s'ha considerat representativa del rang de composicions del material que presenten propietats mecàniques interessants i per tant d'utilitat per comparar-ho amb altres materials composts proposats a altres estudis (Bullions et al., 2006).

3.2. Tècniques de caracterització

Una vegada fabricat el material s'ha procedit a la mesura de diferents propietats físiques, mecàniques i estructurals per tal de caracteritzar-lo i determinar les condicions de fabricació on no hi hagi una caiguda significativa en les propietats mecàniques (particularment resistència i deformació a tensió màxima). Les propietats mesurades han estat:

- Propietats mecàniques de tracció (Apartat 3.2.1):
 - Mòdul de Young
 - Resistència a tensió màxima
 - Deformació a tensió màxima
 - Resistència a la ruptura
 - Deformació a la ruptura
- Absorció d'aigua del compòsit (Apartat 3.2.2)
- Densitat del compòsit (Apartat 3.2.3)
- Anàlisi de compatibilitat (Apartat 3.2.4):
 - Espectroscòpia infraroja per transformada de Fourier (FTIR)
 - Microscòpia electrònica d'escombratge (SEM)

A continuació es farà una descripció d'aquestes propietats abans de presentar els resultats obtinguts a l'apartat 3.3.

3.2.1. Propietats mecàniques de tracció

Les propietats mecàniques descriuen el comportament i la resposta dels materials davant l'aplicació de forces o càrregues. Hi ha diferents propietats mecàniques que determinen el comportament d'un material com la resistència a la tracció, compressió, flexió, torsió i cisallament. En aquesta tesi s'han mesurat les propietats mecàniques de tracció dels materials fabricats. A partir de la corba tensió - deformació, s'ha determinat el mòdul de Young, la resistència i deformació a tensió màxima i la resistència i deformació a la ruptura.

Quan un material és sotmès a dues forces que actuen en sentit contrari (tracció) que es van incrementant de manera contínua, es produeix un allargament de la proveta fins que aquesta trenca. Els resultats de l'assaig es quantifiquen amb les magnituds següents:

- **Deformació o allargament unitari (D)**, que s'obté dividint l'allargament observat ($L - L_0$) per la longitud inicial de la proveta (L_0) i que es calcula segons la següent fórmula:

$$D = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad \text{Equació 3-1}$$

On L és longitud final i L_0 és longitud inicial

- **Tensió (T(Pa))**, que resulta de dividir la força aplicada (F (N)) per la secció original de la proveta (A_0 (m²)):

$$T = \frac{F}{A_0} \quad \text{Equació 3-2}$$

La Figura 3-1 mostra les característiques de la corba tensió - deformació que s'obté generalment en un assaig de tracció:

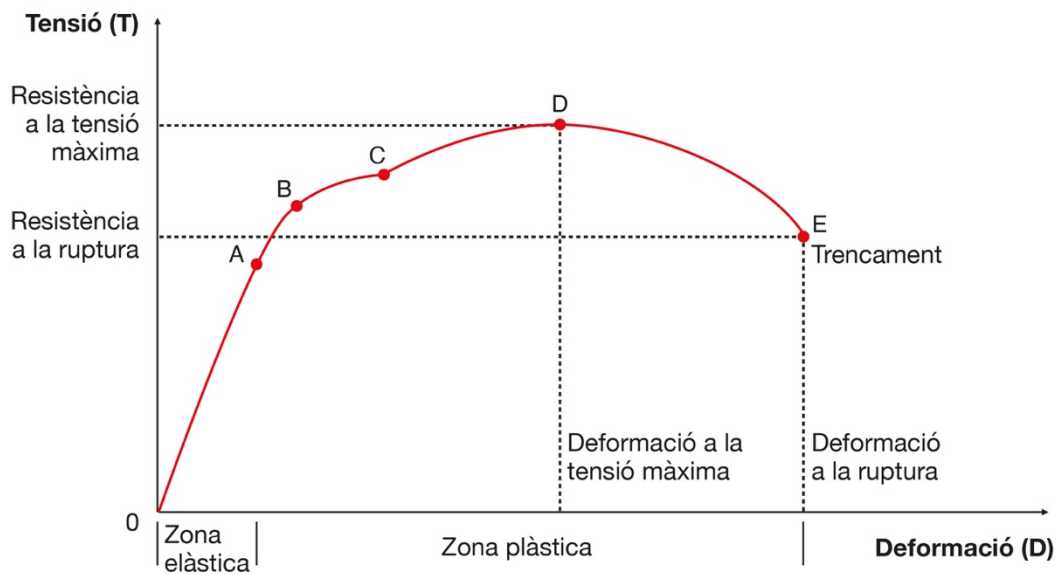


Figura 3-1: Corba tensió - deformació

La zona OA correspon al comportament elàstic del material i indica la tensió i deformació a la que pot arribar sense que hi hagi una deformació permanent de la proveta. És a dir, el màxim que es pot elongar amb la condició que després recuperi la seva longitud original un cop desaparegui la tensió. El pendent de la zona elàstica (OA) és característic de cada material i s'anomena mòdul de Young o mòdul d'elasticitat (E). Aquesta mesura la rigidesa d'un material i per tant la resistència que té un material a ser deformat de forma

elàstica. Matemàticament es defineix com el quocient entre l'esforç aplicat a un material (T) i la deformació (D) resultant d'aquest esforç, dins l'interval lineal de la corba de tensió-deformació:

$$E = \frac{T}{D} \quad \text{Equació 3-3}$$

Aquest és un paràmetre útil per preveure fins a quin punt s'estirarà una peça sota una càrrega determinada. Un valor elevat del mòdul indica que el material és rígid i resistent a la deformació.

La zona BD correspon al comportament plàstic i, en aquest cas, la deformació serà permanent ja que una vegada desapareguda la tensió la proveta no recupera la seva longitud inicial. El punt D representa el valor de la resistència a tensió màxima i a partir d'aquest punt, si es continua incrementant la tensió (zona DE) a la part central de la proveta s'hi produeix una contracció que es coneix amb el nom d'esticció. A mesura que augmenta l'esticció, disminueix la tensió i la ruptura es produeix a una tensió inferior a la màxima suportada (punt E).

Per realitzar l'assaig de tracció, primer cal preparar les provetes tallant convenientment les plaques de material compòsit seguint les especificacions de la norma ASTM 412 (ASTM, 2002). L'assaig de tracció s'ha realitzat amb la màquina 3366 INSTRON que aplica la força a la proveta en la mateixa direcció i en sentits oposats seguint les especificacions de la norma ASTM-D-638-84 (ASTM, 2010). En aquest cas la velocitat de les mordaces s'ha fixat a 1 mm/min. La tensió i la deformació es van registrant a mesura que es va deformant la proveta fins arribar a la ruptura de la mostra. A partir de les corbes tensió-deformació obtingudes s'ha calculat el mòdul de Young, la resistència i la deformació a tensió màxima i la resistència i deformació a la ruptura utilitzant el programa Bluehill, versió 2. S'ha analitzat fins a 8 replicats de cada mostra i s'ha calculat la mitjana i la desviació estàndard. Els resultats es poden consultar a l'apartat 3.3.1.

3.2.2. Estabilitat dimensional: absorció d'aigua

L'estabilitat dimensional és la capacitat que té un material per mantenir la seva forma i les dimensions originals enfront condicions externes com poden ser la humitat, la

temperatura o la pressió. En aquest estudi, s'ha avaluat el canvi de massa de la mostra quan interacciona amb l'aigua. Aquesta propietat es relaciona directament amb la hidrofília o hidrofòbia del material.

L'absorció d'aigua del compost es determina per immersió en aigua a 25°C durant 24 hores (ASTM D570-99) (ASTM, 1999). Abans de la immersió la mostra es tallada i assecada a 60°C durant 24h, refredada al dessecador i pesada (w_0). Després de la immersió s'elimina l'excés d'aigua de la superfície de la mostra abans de pesar-la (w). El percentatge d'absorció d'aigua (WA en %) es calcula segons l'equació següent:

$$WA = \frac{(w - w_0)}{w_0} \cdot 100 \quad \text{Equació 3-4}$$

En aquest cas s'han fet 3 rèpliques de cada mesura i s'ha calculat la mitjana i la desviació estàndard. Els valors obtinguts estan a l'apartat 3.3.6.

3.2.3. Densitat del compost

La densitat mesura la quantitat de massa que té un cos en un determinat volum. S'estableixen dues possibles densitats:

- Densitat absoluta
 - o És la més comúna i mesura la massa per unitat de volum que té un cos.

$$\text{Densitat } (\rho_e) = \frac{\text{Massa}}{\text{Volum}} \quad \text{Equació 3-5}$$

- Densitat relativa
 - o Compara la densitat d'un material amb la de l'aigua i està definida com a pes unitari del material dividit pel pes unitari de l'aigua pura a 4°C.

$$\text{Densitat relativa} = \frac{\text{Densitat de la substància}}{\text{Densitat de l'aigua}} \quad \text{Equació 3-6}$$

S'ha determinat la densitat absoluta (ρ_e) de la mostra de forma experimental per cada percentatge diferent de plomes de pollastre en el material compost amb el mètode del picnòmetre utilitzant alcohol isopropílic com a líquid test (ISO-1183-1) (J. B. Guinée et al., 2001; I.Organisation, 2004). La densitat absoluta s'ha calculat de forma experimental

per cada mostra i també per les mostres amb diferents percentatges de plomes seguint la següent fórmula:

$$\rho_{\text{mostra}} = \left(\frac{\text{Massa}_{\text{mostra}}}{\text{Massa}_{\text{desallotjada}}} \right) \cdot \rho_{\text{isopropanol}} \quad \textbf{Equació 3-7}$$

De cada mostra s'ha mesurat per triplicat i s'ha calculat la mitjana i la desviació estàndard. Els resultats es poden veure a l'apartat 3.3.7.

3.2.4. Anàlisi de compatibilitat per espectroscòpia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) i microscòpia electrònica d'escombratge (SEM)

Per avaluar la compatibilitat entre fibra i matriu s'ha realitzat un estudi de caracterització estructural utilitzant la tècnica d'espectroscòpia d'infraroigs per transformada de Fourier (FTIR) i s'ha obtingut una imatge del material amb microscòpia electrònica d'escombratge (SEM).

El FTIR s'ha realitzat amb un espectròmetre Nicolet Avatar amb òptica Csl. Les mostres han estat pulveritzades i dispersades en una matriu de bromur potàssic (KBr) (9 mg de compost finament dividit en 300 mg de KBr), seguit d'una compressió a 167 MPa per consolidar la formació de la pastilla. Els espectres de FTIR s'han mesurat en el rang de $4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ amb 40 escanejades amb una resolució de 4 cm^{-1} . Les dades dels espectres s'han processat utilitzant el software Omnic i es presenten a l'apartat 3.5.

La SEM utilitza un feix d'electrons que s'envia a la mostra per elaborar-ne una imatge. A partir d'aquesta imatge s'examinen les superfícies de fractura de les mostres trencades a l'assaig de tracció. S'ha utilitzat un microscopi SEM model JEOL 5610 (JEOL, USA) amb un voltatge accelerat de 10 kV. Les mostres s'han recobert amb una capa d'or-platí per tal d'incrementar la seva conductivitat. Amb aquesta tècnica s'han observat mostres amb diferents percentatges de plomes. La valoració de les imatges obtingudes es fa a l'apartat 3.5.

3.3. Resultats obtinguts de la caracterització del material amb diferents condicions de producció del material

Les propietats mecàniques de tracció s'han determinat per a cada una de les diferents condicions de fabricació esmentades a l'apartat 3.1.3 (Taula 3-1) a partir de la corba tensió-deformació de les plaques de PLA/PIP amb un 20% de PIP. A continuació es presenten els resultats per a cada una de les propietats mecàniques estudiades en funció de la temperatura del procés, el temps i la velocitat de mescla. Les dades experimentals d'aquests resultats es poden consultar a l'Annex B.

3.3.1. Mòdul de Young

A la següent taula (Taula 3-2) es mostra la mitjana dels resultats i les desviacions estàndard (s) obtinguts del mòdul de Young per cada una de les mostres:

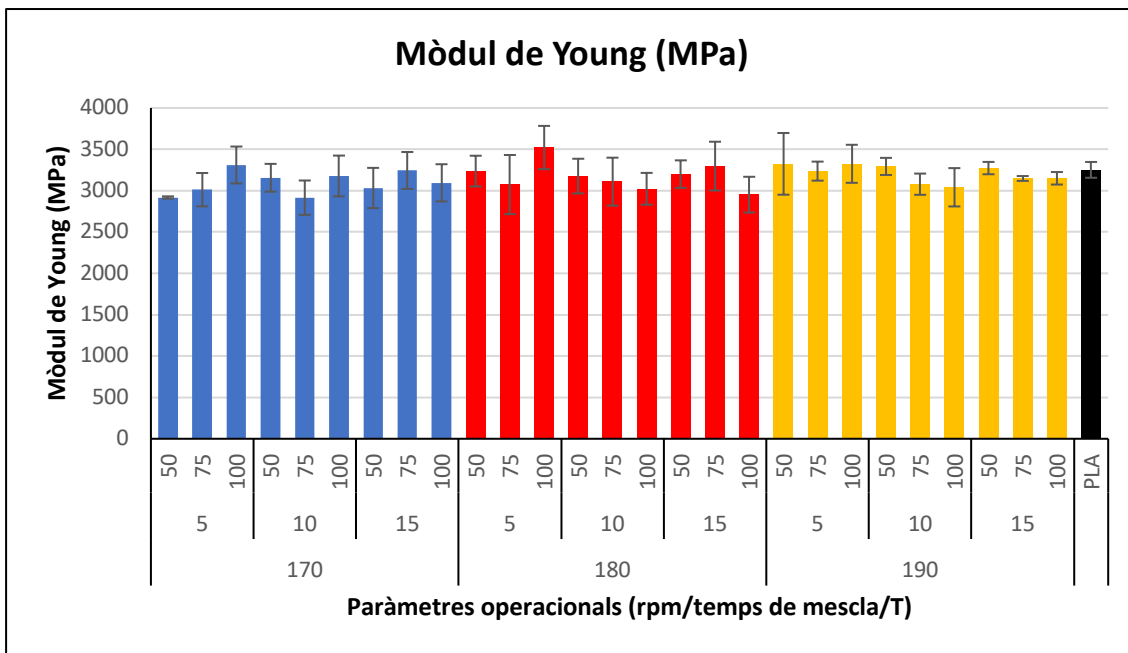
Taula 3-2: Resultats de mòdul de Young per cada proveta amb un 20% de plomes

Codi de la mostra	Mòdul de Young (MPa)		Codi de la mostra	Mòdul de Young (MPa)	
	Mitjana	s		Mitjana	s
1-170-5-50	2918	13	15-180-10-100	3023	192
2-170-5-75	3012	201	16-180-15-50	3200	166
3-170-5-100	3311	223	17-180-15-75	3297	295
4-170-10-50	3156	168	18-180-15-100	2952	216
5-170-10-75	2915	208	19-190-5-50	3324	373
6-170-10-100	3178	247	20-190-5-75	3236	115
7-170-15-50	3032	243	21-190-5-100	3325	230
8-170-15-75	3244	223	22-190-10-50	3293	103
9-170-15-100	3095	225	23-190-10-75	3078	128
10-180-5-50	3237	186	24-190-10-100	3041	232
11-180-5-75	3074	358	25-190-15-50	3273	75
12-180-5-100	3522	261	26-190-15-75	3147	29
13-180-10-50	3176	210	27-190-15-100	3150	76

Codi de la mostra	Mòdul de Young (MPa)	
	Mitjana	s
14-180-10-75	3109	290

Codi de la mostra	Mòdul de Young (MPa)	
	Mitjana	s
28-170-5-50	3252	96

Per tal de visualitzar millor aquests resultats se n’ha fet una representació gràfica (Gràfica 3-1) agrupant els resultats per cada una de les condicions de producció:



Gràfica 3-1: Valors de mòdul de Young (MPa) per una placa de compòsit 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C)

El primer que s’observa és que el mòdul de Young del PLA pur (3252 ± 96 MPa) no es veu afectat significativament per la presència d’un 20% de PIP al material. Tampoc s’observen diferències significatives (segons test d’anàlisi de variància amb una significança del 5% (Annex C: Resultats anàlisi estadístic)) entre les diferents mostres analitzades, per tant els canvis en les condicions de fabricació no fan variar el mòdul de Young del material compòsit i s’observen valors similars al PLA pur.

Degut a que el valor del mòdul de Young no es veu afectat per les condicions assajades de fabricació del material compòsit (temperatura, temps i velocitat de mescla), per aquest motiu es consideraran altres factors com ara la simplicitat o el menor consum energètic per prioritzar les condicions de fabricació.

3.3.2. Resistència a tensió màxima

Analitzant les dades de tensió a màxim de càrrega reflectides a la Taula 3-3 i a la Gràfica 3-2 s'observa una gran disminució del valor de resistència a tensió màxima del compost (en totes les condicions de fabricació estudiades) comparat amb el PLA pur (50,3 MPa \pm 3,5). Aquest comportament també es pot observar en altres composts que, o bé, no tenen una bona compatibilitat o que l'addició de fibres de reforç distorsiona la microestructura del material donant lloc a punts de concentració de tensions per on es produeixen fissures que promouen el trencament de la mostra.

Aquesta disminució de la resistència a tensió màxima pot arribar a ser de fins a un 70% en el cas de processar la mostra a 190°C durant 15 minuts a 100 rpm, probablement degut a que en aquestes condicions la mostra es degrada per una exposició a una T elevada (190°C) durant un temps llarg (15 min) amb una velocitat de rotació alta (100 rpm). De fet s'observa un efecte significatiu de temperatura i temps en el valor de la resistència a tensió màxima tal i com s'ha comprovat a l'estudi d'anàlisi de variància (veure Annex C: Resultats anàlisi estadístic).

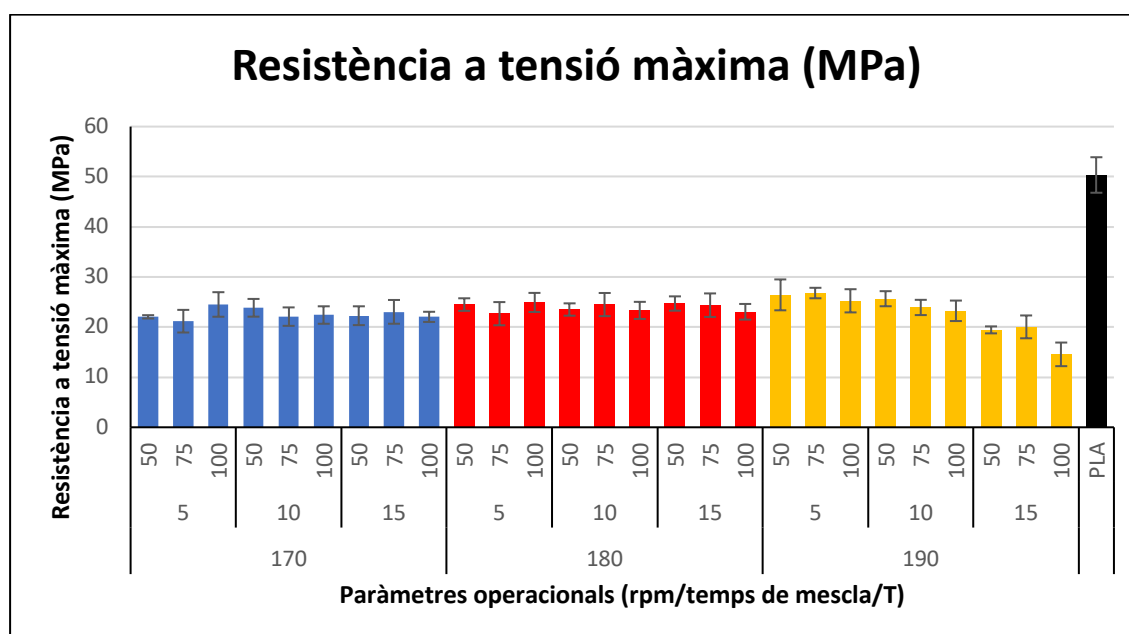
Per tant, per obtenir una resistència elevada evitant la degradació de la mostra es preferible treballar a temperatures per sota els 190°C, com 170°C o 180°C i durant temps curts (p.e. 5 min) i a baixes revolucions (p.e. 50 rpm).

Taula 3-3: Resultats de la resistència a tensió màxima per cada proveta amb un 20% de plomes

Codi de la mostra	Resistència a tensió màxima (MPa)		Codi de la mostra	Resistència a tensió màxima (MPa)	
	Mitjana	s		Mitjana	s
1-170-5-50	22,0	0,3	15-180-10-100	23,3	1,7
2-170-5-75	21,2	2,3	16-180-15-50	24,7	1,4
3-170-5-100	24,5	2,5	17-180-15-75	24,3	2,3
4-170-10-50	23,9	1,8	18-180-15-100	23,0	1,6
5-170-10-75	22,1	1,8	19-190-5-50	26,4	3,1
6-170-10-100	22,4	1,7	20-190-5-75	26,8	1,0
7-170-15-50	22,3	1,9	21-190-5-100	25,2	2,3
8-170-15-75	23,0	2,4	22-190-10-50	25,6	1,5

Codi de la mostra	Resistència a tensió màxima (MPa)	
	Mitjana	s
9-170-15-100	22,0	1,0
10-180-5-50	24,5	1,3
11-180-5-75	22,7	2,3
12-180-5-100	24,9	1,9
13-180-10-50	23,5	1,2
14-180-10-75	24,5	2,3

Codi de la mostra	Resistència a tensió màxima (MPa)	
	Mitjana	s
23-190-10-75	23,9	1,5
24-190-10-100	23,2	2,0
25-190-15-50	19,4	0,7
26-190-15-75	20,0	2,3
27-190-15-100	14,5	2,4
28-170-5-50	50,3	3,5



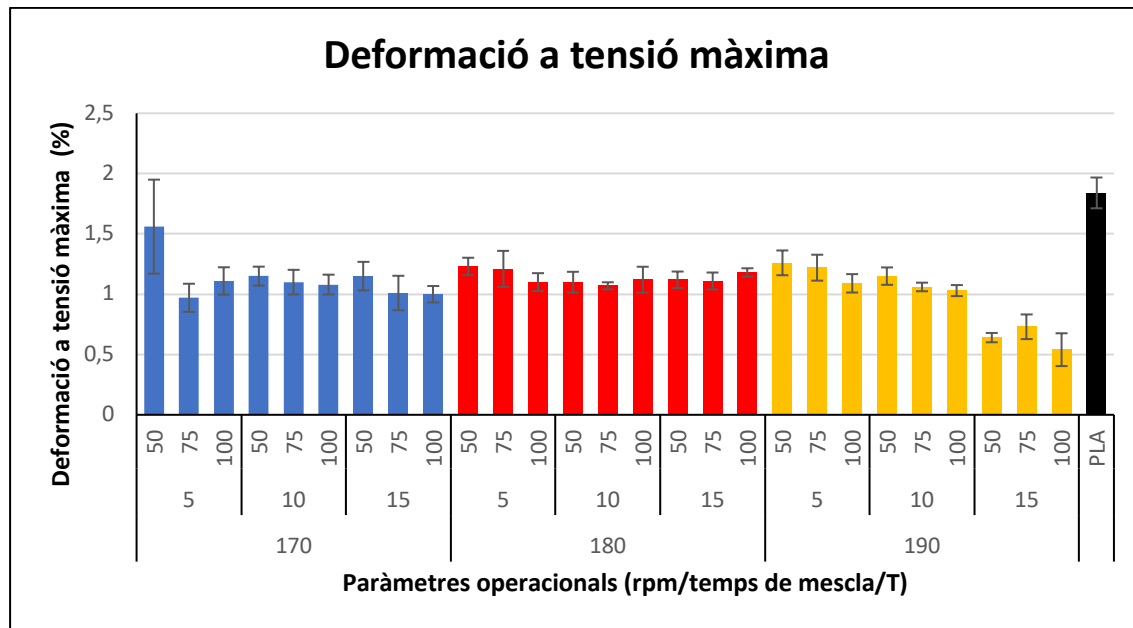
Gràfica 3-2: Valors de resistència a tensió màxima (MPa) per una placa de compost 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C)

3.3.3. Deformació a tensió màxima

En el cas de la deformació a tensió màxima els valors presentats a la Taula 3-4 i la Gràfica 3-3 permeten observar una tendència similar a la de la resistència a tensió màxima. La disminució respecte al PLA 100% és important en totes les condicions de fabricació sobretot per temperatura i temps de mescla elevats.

Taula 3-4: Resultats de deformació a tensió màxima per cada proveta amb un 20% de plomes

Codi de la mostra	Deformació a tensió màxima (%)		Codi de la mostra	Deformació a tensió màxima (%)	
	Mitjana	s		Mitjana	s
1-170-5-50	1,56	0,39	15-180-10-100	1,12	0,11
2-170-5-75	0,97	0,12	16-180-15-50	1,12	0,07
3-170-5-100	1,11	0,11	17-180-15-75	1,11	0,07
4-170-10-50	1,15	0,08	18-180-15-100	1,18	0,03
5-170-10-75	1,10	0,10	19-190-5-50	1,26	0,10
6-170-10-100	1,08	0,08	20-190-5-75	1,22	0,11
7-170-15-50	1,15	0,12	21-190-5-100	1,09	0,08
8-170-15-75	1,01	0,14	22-190-10-50	1,15	0,07
9-170-15-100	1,00	0,07	23-190-10-75	1,06	0,04
10-180-5-50	1,23	0,07	24-190-10-100	1,03	0,05
11-180-5-75	1,21	0,15	25-190-15-50	0,64	0,04
12-180-5-100	1,10	0,07	26-190-15-75	0,73	0,10
13-180-10-50	1,10	0,09	27-190-15-100	0,54	0,14
14-180-10-75	1,07	0,03	28-170-5-50	1,84	0,13



Gràfica 3-3: Valors de deformació a tensió màxima per una placa de compòsit 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C)

3.3.4. Resistència a la ruptura

Per aquest paràmetre (Taula 3-5 i la Gràfica 3-4) es veu una clara disminució de la resistència a la ruptura independentment de la temperatura de treball, del temps de mescla i de les revolucions per minut. Aquesta disminució probablement és deguda a l'addició de plomes a la matriu i no a les condicions de fabricació.

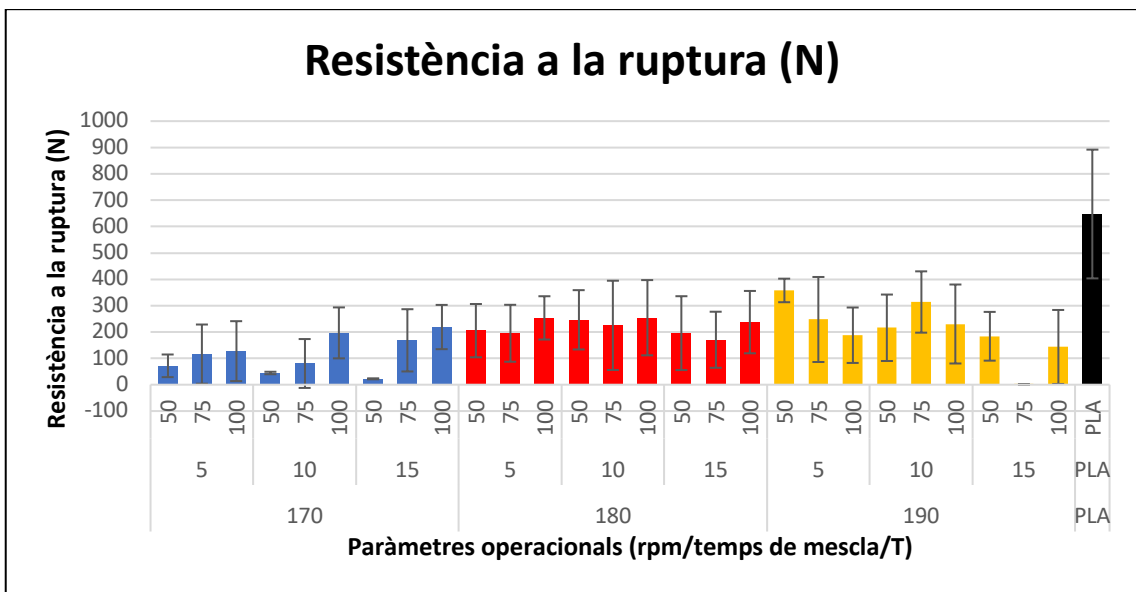
Taula 3-5: Resultats de resistència a la ruptura per cada proveta amb un 20% de plomes

Codi de la mostra	Deformació a tensió màxima (%)	
	Mitjana	s
1-170-5-50	72	43
2-170-5-75	116	112
3-170-5-100	127	114
4-170-10-50	44	5
5-170-10-75	80	93
6-170-10-100	197	97

Codi de la mostra	Deformació a tensió màxima (%)	
	Mitjana	s
15-180-10-100	254	143
16-180-15-50	196	140
17-180-15-75	171	106
18-180-15-100	237	118
19-190-5-50	358	45
20-190-5-75	247	161

Codi de la mostra	Deformació a tensió màxima (%)	
	Mitjana	s
7-170-15-50	22	2
8-170-15-75	168	118
9-170-15-100	219	84
10-180-5-50	205	101
11-180-5-75	195	108
12-180-5-100	254	82
13-180-10-50	246	113
14-180-10-75	225	169

Codi de la mostra	Deformació a tensió màxima (%)	
	Mitjana	s
21-190-5-100	188	105
22-190-10-50	216	126
23-190-10-75	314	116
24-190-10-100	230	149
25-190-15-50	184	92
26-190-15-75	0,65	0,04
27-190-15-100	143	140
28-170-5-50	648	244



Gràfica 3-4: Valors de resistència a la ruptura per una placa de compost 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C)

3.3.5. Deformació a la ruptura

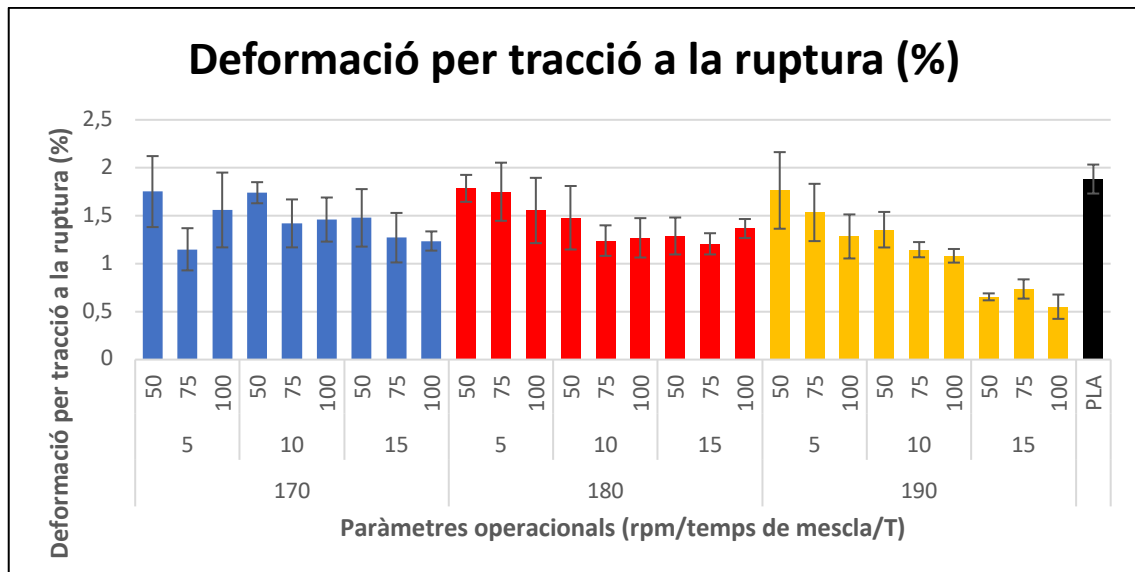
Pel que fa a la deformació per tracció a la ruptura, els resultats obtinguts (Taula 3-6 i Gràfica 3-5) permeten constatar que no hi ha un gran canvi a l'addicionar un 20% de PIP quan les condicions de fabricació es porten a terme amb el mínim temps i la mínima

velocitat de mescla. Per contra, s'observa una gran disminució quan el temps de mescla i la velocitat són elevats, sent especialment gran quan treballem a 190°C durant 15 minuts.

Taula 3-6: Resultats de la deformació per tracció a la ruptura per cada proveta amb un 20% de plomes

Codi de la mostra	Deformació per tracció a la ruptura (%)	
	Mitjana	s
1-170-5-50	1,7	0,4
2-170-5-75	1,1	0,2
3-170-5-100	1,6	0,4
4-170-10-50	1,7	0,1
5-170-10-75	1,4	0,2
6-170-10-100	1,4	0,2
7-170-15-50	1,5	0,3
8-170-15-75	1,3	0,3
9-170-15-100	1,2	0,1
10-180-5-50	1,8	0,1
11-180-5-75	1,7	0,3
12-180-5-100	1,5	0,3
13-180-10-50	1,5	0,3
14-180-10-75	1,2	0,2

Codi de la mostra	Deformació per tracció a la ruptura (%)	
	Mitjana	s
15-180-10-100	1,3	0,2
16-180-15-50	1,3	0,2
17-180-15-75	1,2	0,1
18-180-15-100	1,4	0,1
19-190-5-50	1,8	0,4
20-190-5-75	1,5	0,3
21-190-5-100	1,3	0,2
22-190-10-50	1,3	0,2
23-190-10-75	1,15	0,08
24-190-10-100	1,08	0,07
25-190-15-50	0,65	0,04
26-190-15-75	0,7	0,1
27-190-15-100	0,5	0,1
28-170-5-50	1,9	0,1



Gràfica 3-5: Valors de deformació per tracció a la ruptura (%) per una placa de compost 80/20 v/v PLA/PIP en funció dels paràmetres operacionals. A l'eix de les x la primera fila correspon a la velocitat de mescla (rpm), la segona al temps de mescla (min) i la tercera a la temperatura (°C)

A partir dels resultats de les propietats mecàniques presentats (capítol 3.3.1 a 3.3.5) cal valorar quines són les condicions òptimes de producció per obtenir un material biocompost amb les millors propietats mecàniques possibles.

Una observació clara és que a temperatura de 190°C i temps de mescla de 15 minuts s'observa una disminució dels valors de resistència a tensió màxima i de deformació tant a tensió màxima com a la ruptura. En aquestes condicions de treball es pot observar una degradació del material que no s'observa en temps més curts de mescla i temperatures més baixes.

En el cas de la deformació a la ruptura un menor temps de mescla implica un valor més elevat mentre que en els valors de resistència a tensió màxima no s'observa cap tendència clara al variar els temps de mescla. Tot i que sí que s'observa una disminució d'aquesta propietat respecte al PLA pur en tots els casos.

Pel que fa a la velocitat de mescla també s'observa que en la deformació a la ruptura el material presenta millors propietats mecàniques a velocitats més baixes.

A partir d'aquestes observacions s'han fixat les condicions de processat per fer proves del material amb diferents percentatges de ploma amb unes condicions de treball de 180°C de temperatura, 5 minuts de mescla i 50 rpm de mescla (apartat 3.3). En aquestes condicions de fabricació, l'addició d'un 20% de PIP al PLA 100% no provoca una

disminució significativa del mòdul de Young ni de la deformació per tracció a la ruptura ($\approx 3,25$ GPa i $\approx 1,8\%$ respectivament per al PLA 100%), però en canvi la resta de propietats mecàniques estudiades sí que baixen considerablement.

3.3.6. Absorció d'aigua

Els valors d'absorció d'aigua (els valors experimentals es poden consultar a l'Annex D) de les mostres indicades a la Taula 3-7 i a la Gràfica 3-6 permeten observar que no hi ha relació clara amb cap dels tres paràmetres estudiats (temperatura, temps i velocitat d'agitació). El valor d'absorció d'aigua del PLA pur és de $0,4 \pm 0,1\%$, valor que coincideix amb el determinat per (Finkenstadt et al., 2007) que és de fins a un 1%.

Observant amb més detall, es pot veure que per quasi totes les mostres de material compost analitzades el percentatge d'absorció d'aigua oscil·la en un rang entre el 1,5 i el 2,5% i que hi ha 2 valors que s'allunyen molt d'aquest rang. Aquests valors corresponen a les mostres preparades a 170°C durant 15 minuts a 75 rpm (valor mínim de $0,4 \pm 0,3$) i a 180°C durant 10 minuts a 50 rpm (valor màxim de $3,7 \pm 0,4$). Aquesta diferència pot ser deguda a la major heterogeneïtat de les mostres o a un error experimental.

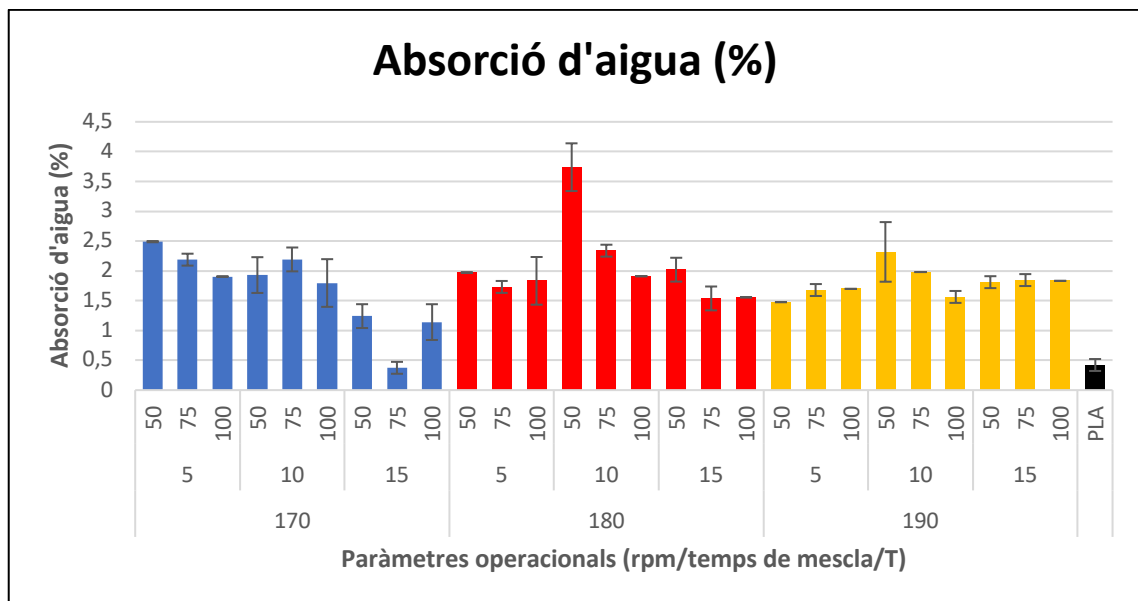
Aquest increment del percentatge d'absorció d'aigua és previsible, degut a que les PIP són més hidrofíliques que la matriu de PLA i per tant el material amb PIP té una major capacitat d'absorció d'aigua donant lloc a un material amb pitjor estabilitat dimensional.

Taula 3-7: Resultats d'absorció d'aigua per cada proveta amb un 20% de plomes

Codi de la mostra	Adsorció d'aigua (%)		Codi de la mostra	Adsorció d'aigua (%)	
	Mitjana	s		Mitjana	s
1-170-5-50	2,49	0,01	15-180-10-100	1,91	0,05
2-170-5-75	2,19	0,07	16-180-15-50	2,02	0,16
3-170-5-100	1,90	0,01	17-180-15-75	1,54	0,16
4-170-10-50	1,93	0,30	18-180-15-100	1,56	0,05
5-170-10-75	2,19	0,23	19-190-5-50	1,48	0,02

Codi de la mostra	Adsorció d'aigua (%)	
	Mitjana	s
6-170-10-100	1,80	0,43
7-170-15-50	1,24	0,19
8-170-15-75	0,37	0,34
9-170-15-100	1,14	0,28
10-180-5-50	1,97	0,04
11-180-5-75	1,73	0,06
12-180-5-100	1,83	0,36
13-180-10-50	3,74	0,44
14-180-10-75	2,34	0,12

Codi de la mostra	Adsorció d'aigua (%)	
	Mitjana	s
20-190-5-75	1,68	0,08
21-190-5-100	1,70	0,01
22-190-10-50	2,32	0,51
23-190-10-75	1,98	0,04
24-190-10-100	1,56	0,13
25-190-15-50	1,81	0,14
26-190-15-75	1,85	0,07
27-190-15-100	1,83	0,03
28-170-5-50	0,42	0,12



Gràfica 3-6: Absorció d'aigua en diferents condicions de producció per una placa del 20% de plomes

3.3.7. Densitat del compost

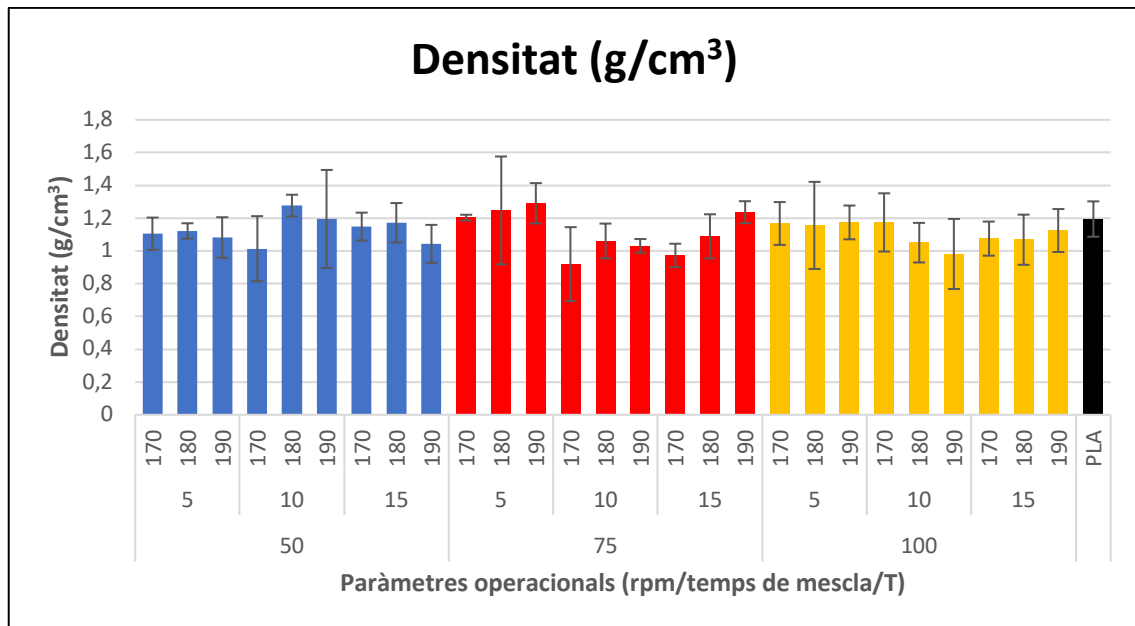
Els valors de densitat de les diferents plaques han estat determinats experimentalment (resultats complets a l'Annex E) tal i com es pot observar a la Taula 3-8 i a la Gràfica 3-7. En aquest cas tampoc s'observa cap tendència clara que permeti definir unes

condicions òptimes de treball. El que es pot remarcar és que els valors mitjans oscil·len en un rang entre 0,9 i 1,3 g/cm³.

Taula 3-8: Resultats de densitat per cada proveta amb un 20% de plomes

Codi de la mostra	Densitat (g/cm ³)	
	Mitjana	s
1-170-5-50	1,10	0,10
2-170-5-75	1,20	0,05
3-170-5-100	1,17	0,12
4-170-10-50	1,01	0,20
5-170-10-75	0,92	0,07
6-170-10-100	1,17	0,30
7-170-15-50	1,15	0,09
8-170-15-75	0,97	0,12
9-170-15-100	1,08	0,12
10-180-5-50	1,12	0,02
11-180-5-75	1,25	0,33
12-180-5-100	1,16	0,12
13-180-10-50	1,28	0,23
14-180-10-75	1,06	0,11

Codi de la mostra	Densitat (g/cm ³)	
	Mitjana	s
15-180-10-100	1,05	0,04
16-180-15-50	1,17	0,07
17-180-15-75	1,09	0,13
18-180-15-100	1,07	0,07
19-190-5-50	1,08	0,13
20-190-5-75	1,29	0,27
21-190-5-100	1,17	0,10
22-190-10-50	1,20	0,18
23-190-10-75	1,03	0,12
24-190-10-100	0,98	0,21
25-190-15-50	1,04	0,10
26-190-15-75	1,24	0,15
27-190-15-100	1,12	0,13
28-170-5-50	1,19	0,11



Gràfica 3-7: Densitat en diferents condicions de producció per una placa del 20% de plomes

Es confirma que el fet d'afegir ploma a la matriu de PLA no incrementa la densitat del material, obtenint materials amb una densitat lleugerament inferior a la de la matriu pura.

Com que no s'han determinat grans diferències ni en la densitat ni en l'absorció d'aigua del material compost al variar les condicions de fabricació s'han mantingut les condicions òptimes fixades a partir de les propietats mecàniques. Aquestes condicions de treball són 180°C de temperatura, 5 minuts de mescla i 50 rpm de velocitat de mescla.

3.4. Estudi de la variació de les propietats amb diferents proporcions de plomes

Una vegada establertes les condicions de processat del material (apartat 3.3) cal veure com varien les propietats al canviar la proporció de plomes dins del material. Per tant s'han preparat materials amb matriu de PLA i diferents proporcions de plomes (amb un 5, 10, 15, 20 i 25% v/v) treballant amb les condicions òptimes de fabricació seleccionades a l'apartat 3.3 (180°C, 5 min, 50 rpm). Les proporcions de material estudiades i els codis de les mostres són:

Taula 3-9: Proporcions de plomes estudiades

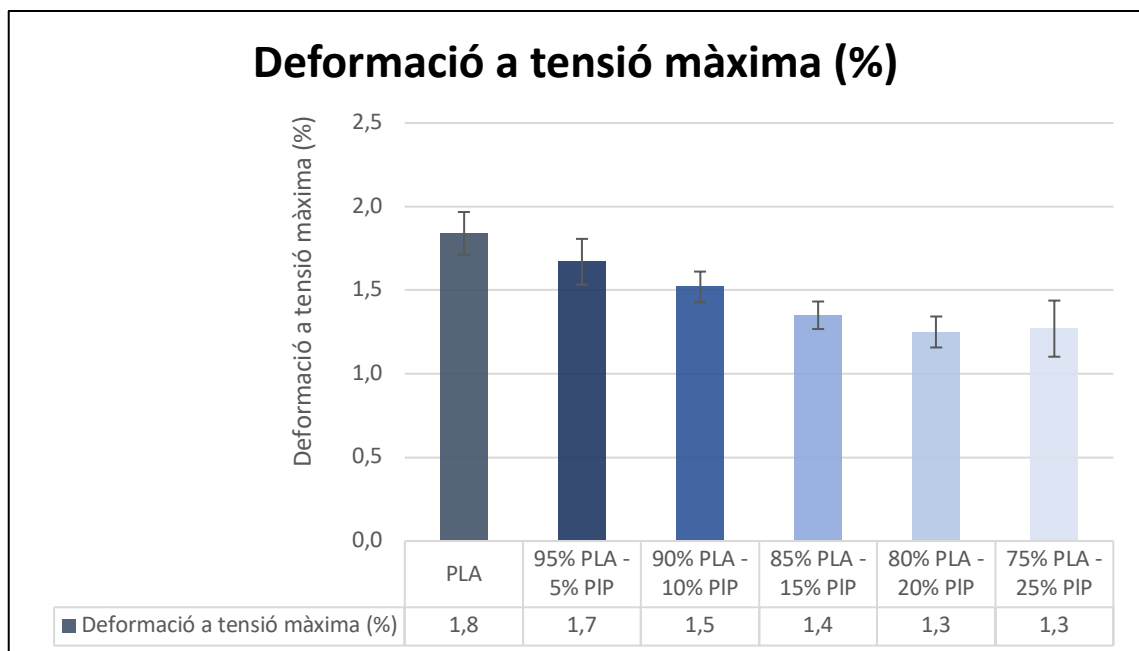
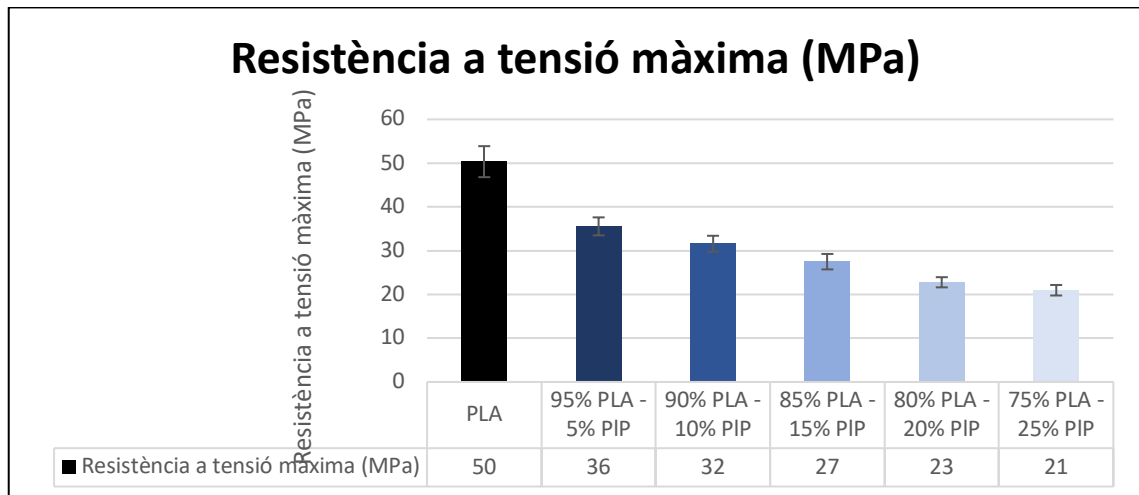
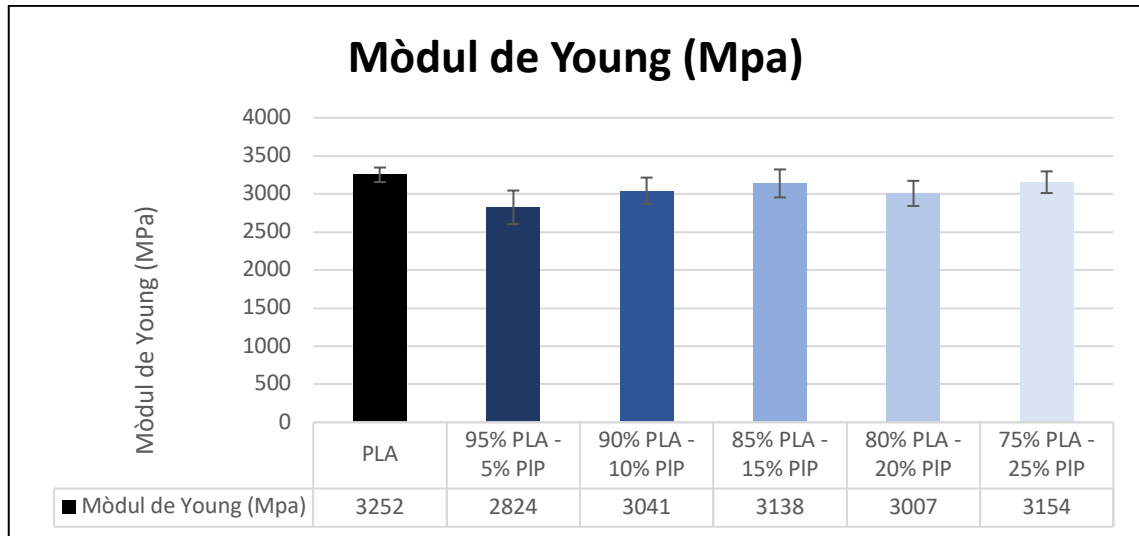
Mescla en volum	Codi de la mostra
95% PLA - 5% PIP	29-180-5-50
90% PLA - 10% PIP	30-180-5-50
85% PLA - 15% PIP	31-180-5-50
80% PLA - 20% PIP	32-180-5-50
75% PLA - 25% PIP	33-180-5-50

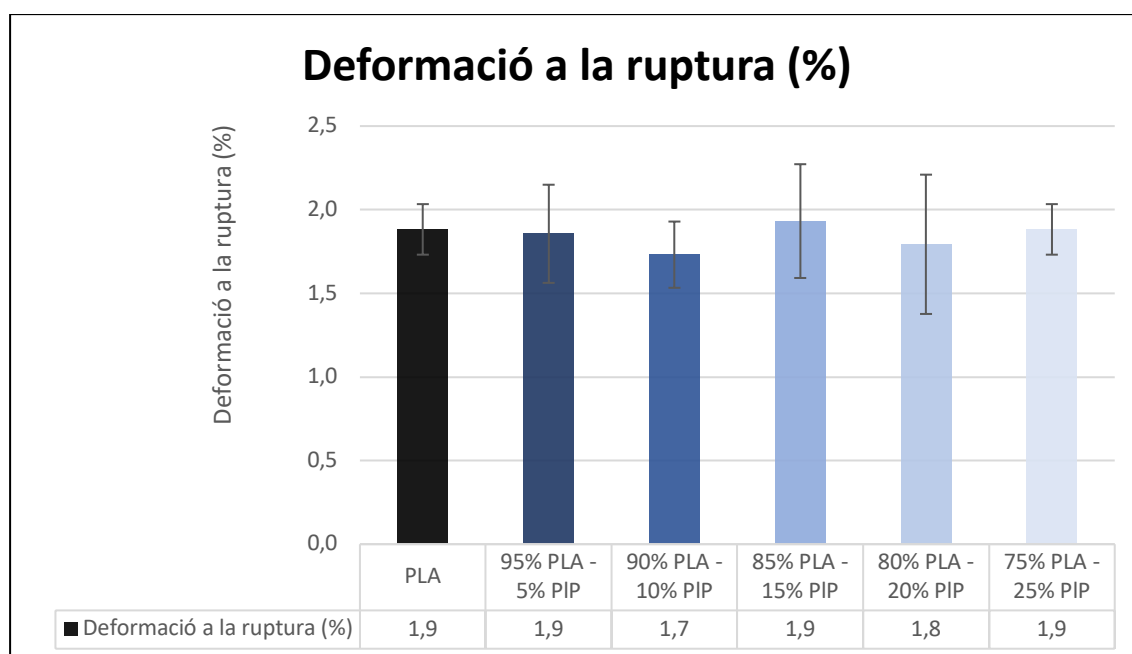
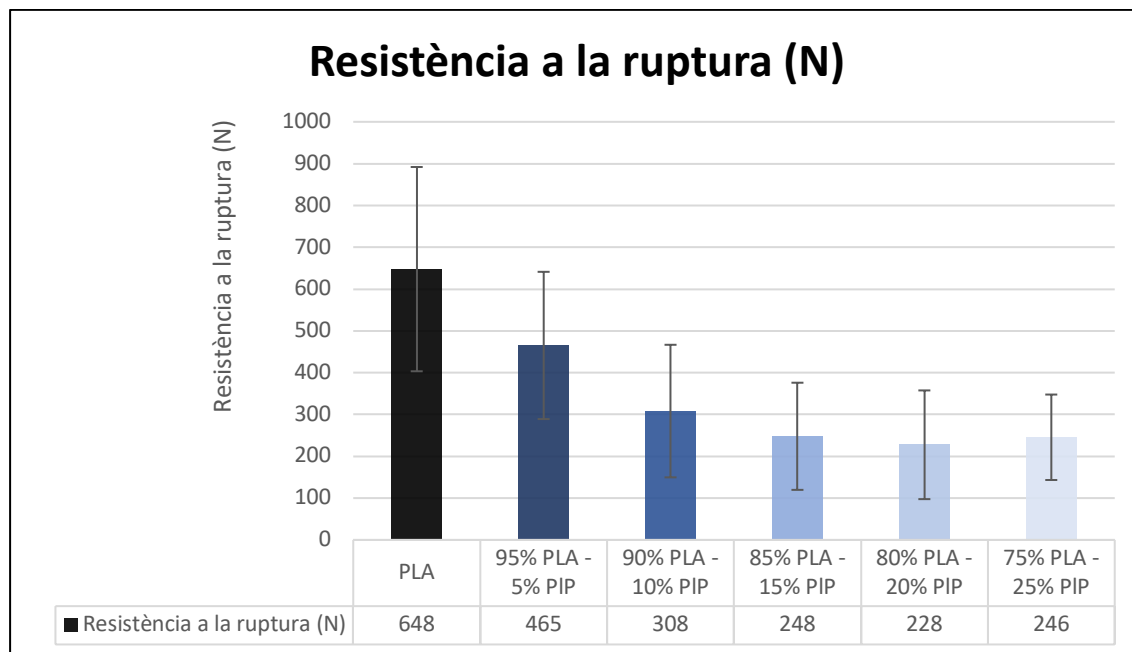
Observant la Gràfica 3-8 i la Taula 3-10, es pot afirmar que el mòdul de Young no es veu afectat al canviar el contingut de PIP al material entre un 5 i un 25% i, la disminució mòdul és, per a la majoria dels casos, inferior a un 10%. Aquests resultats mostren la viabilitat d'obtenir un compòsit amb una rigidesa similar a la de la matriu pura incorporant un percentatge de ploma de fins un 25%.

En el cas de la deformació a la ruptura tampoc es veu molt afectada per l'addició de plomes al material, mantenint-se pràcticament constant.

Taula 3-10: Resultats de propietats mecàniques per les diferents proporcions de plomes

Mescla en volum (PLA- PIP)	Mòdul de Young (MPa)		Resistència a tensió màxima (MPa)		Deformació a tensió màxima (%)		Resistència a la ruptura (N)		Deformació per tracció a la ruptura (%)	
	Mitjana	s	Mitjana	s	Mitjana	s	Mitjana	s	Mitjana	s
100% PLA	3252	96	50	4	1,8	0,1	648	244	1,9	0,2
95% – 5%	2824	221	36	2	1,7	0,1	465	176	1,9	0,3
90% – 10%	3041	174	32	2	1,5	0,1	308	159	1,7	0,2
85% – 15%	3138	184	27	2	1,4	0,1	248	128	1,9	0,3
80% – 20%	3007	165	23	1	1,3	0,1	228	130	1,8	0,4
75% – 25%	3154	142	21	1	1,3	0,2	246	102	1,9	0,2





Gràfica 3-8: Propietats mecàniques de tracció en funció del percentatge de PIP del material compòsit

En canvi la resistència a tensió màxima i la resistència a la ruptura disminueixen amb l'addició de PIP tal i com també s'observa en casos similars amb matrius diferents (Colom et al., 2013). La disminució arriba al voltant del 60% per les dues propietats en els compòsits amb un 25% v/v de PIP. Aquest comportament es pot explicar (tal i com es veurà a l'apartat 3.5) per la deficient adhesió de la interfície fibra-matriu i per la presència de microespais buits que actuen com a concentradors de tensió quan es sotmeten els

materials a esforços de tracció. En aquest cas, els resultats obtinguts fan descartar l'efecte reforçador de les plomes tot indicant que aquestes es comporten com un material de càrrega.

En termes generals, les tendències en les propietats mecàniques coincideixen amb les obtingudes per (Cheng et al., 2009) pels composts preparats utilitzant fibres de plomes de pollastre separades del raquis amb PLA que apunten cap a una lleugera millora del mòdul i una disminució de la resistència a tensió màxima i de la deformació a la ruptura quan s'incrementa el % de plomes fins a un 10% v/v.

En el cas estudiat en aquesta tesi la disminució de la resistència a la tracció ha estat més gran segurament degut al major percentatge de plomes afegides (fins un 25%) i a la naturalesa del material de reforç, ja que la ploma es tritura sencera sense seleccionar prèviament cap part de la ploma. Veient els resultats, es pot suggerir que la separació de les fibres no és necessària ja que la millora en les propietats mecàniques no és significativa i el procés sense aquesta etapa de separació és molt més senzill.

Per altra banda, també hi ha resultats que difereixen dels obtinguts com els presentats per (J. Barone et al., 2005) que descriuen un increment significatiu del mòdul de Young i de la resistència a la tracció a l'addicionar fibres de PIP a una matriu de polietilè. La relació longitud/diàmetre de les fibres pot ser un factor clau per explicar aquestes diferències.

Després d'analitzar les propietats mecàniques del materials és interessant comparar-les amb les propietats mecàniques d'altres materials biodegradables similars. Per això s'ha utilitzat el programa CES-EduPack i la seva base de dades (Granta Design Limited, 2012) per construir un diagrama on es representen diferents materials en funció del seu mòdul de Young i la seva resistència a la tracció.

A la Figura 3-2 s'observa com els valors experimentals del PLA utilitzant a les mostres processades al laboratori (PLA exp) són propers als valors de la bibliografia (PLA) i que els materials obtinguts en aquest treball (PLA-CFs) presenten uns valors més baixos de resistència a tensió màxima que el polímer pur i els materials obtinguts per (Cheng et al., 2009) amb fibres de ploma (PLA-CFFs).

És important remarcar que el material estudiat (PLA-CFs) té un comportament mecànic millor en resistència a la tracció que els aglomerats de fibra de densitat mitjana (DMF) i

que els aglomerats de partícules amb resines orgàniques, tant a la configuració paral·lela (par) com a la perpendicular (per) de les fibres al tauler.

A partir d'aquestes propietats mecàniques es pot observar que el material obtingut amb PLA i PIP té unes característiques similars a alguns papers i cartrons. Si es compara amb les fustes, les propietats són intermèdies entre les diferents classes de fustes en funció de la direcció de la veta. Si la veta és transversal, les propietats del material compost són millors i si la veta és longitudinal les propietats del PLA/PIP són pitjors.

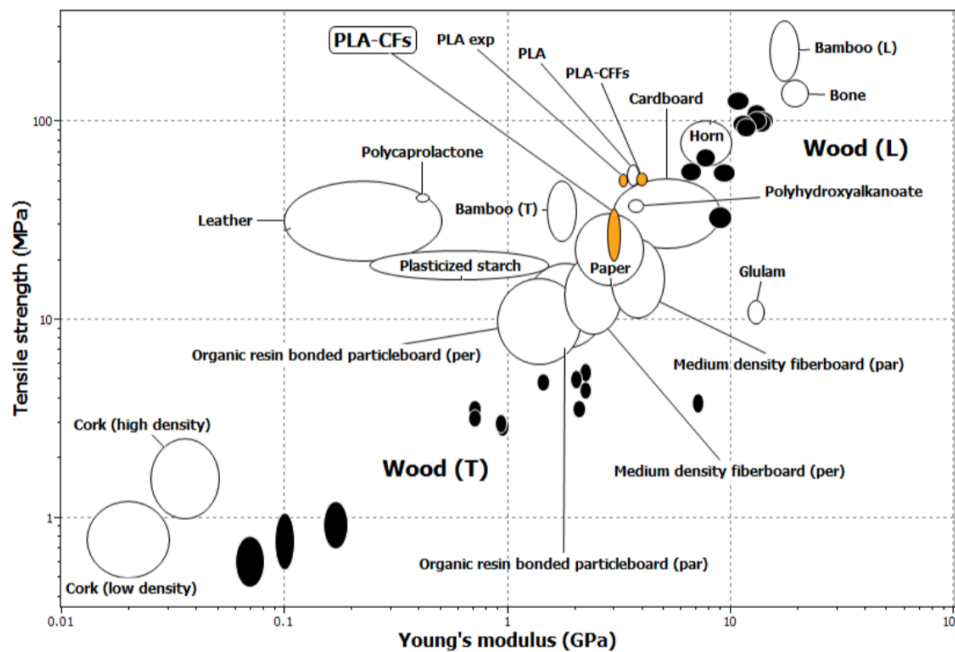


Figura 3-2: Esforç màxim de càrrega vs mòdul de Young per materials biodegradables. Figura feta amb el programa CES-EduPack a partir de dades pròpies i de dades de la seva base de dades. Les marques negres corresponen a diverses fustes amb diferents direccions de veta: transversal (T) o longitudinal (L)

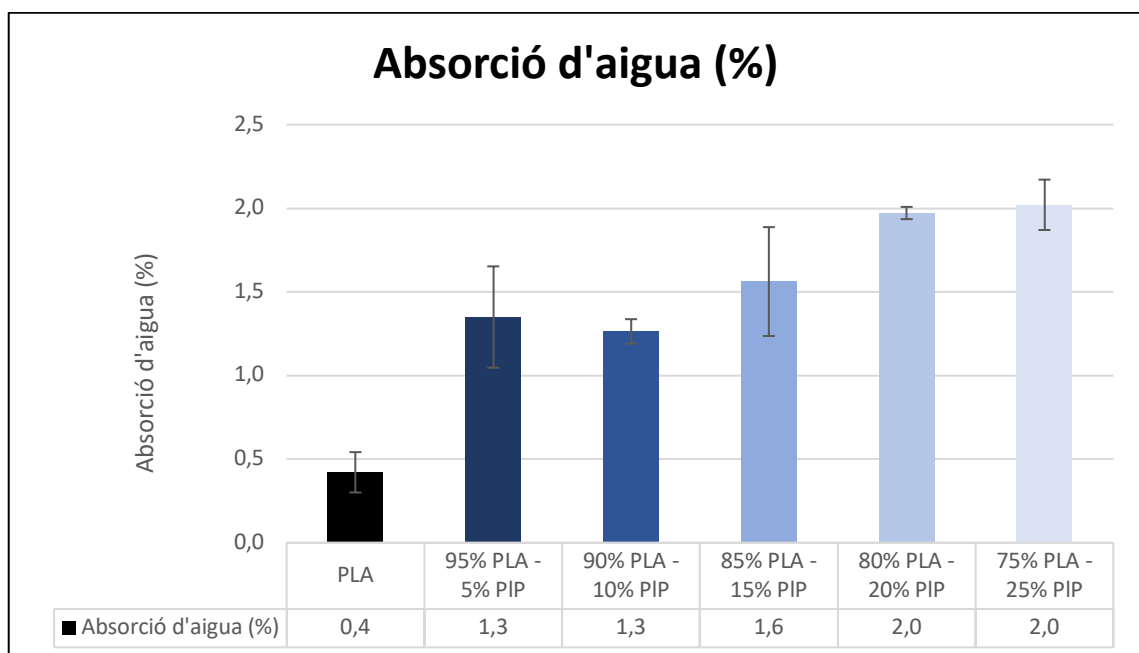
A part de les propietats mecàniques, també s'ha mesurat l'absorció d'aigua i la densitat dels composts amb diferents % de PIP. Aquests resultats, que es poden veure a la Taula 3-11 i a la Gràfica 3-9, mostren que el percentatge d'absorció d'aigua augmenta a l'afegir PIP fins a un 2%. Aquests valors coincideixen amb altres valors publicats i també amb la naturalesa més hidrofílica de les PIP de les que se n'ha determinat l'absorció d'aigua al voltant del 40% (Carrillo, Rahhali, Canavate, et al., 2013). Aquesta absorció d'aigua demostra que l'estabilitat dimensional dels composts es veu clarament afectada per l'addició de plomes de pollastre (Carrillo et al., 2012). De tota manera, és important remarcar que, tot i el valor associat a les PIP soles, l'absorció d'aigua dels materials

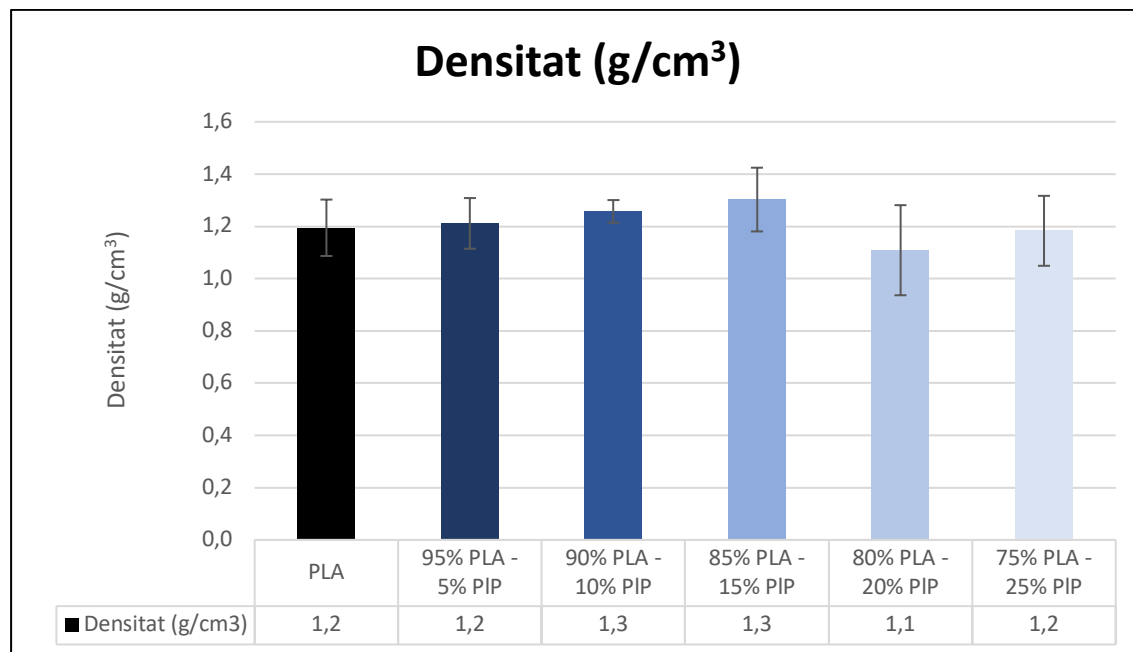
compòsits no excedeix mai del 2,5% degut a la presència d'una matriu hidrofòbica que dificulta la difusió de l'aigua. Respecte a la densitat, els valors mesurats són força similars i no segueixen un patró clar en relació al contingut de PIP.

A partir d'aquestes dades, és pot afirmar que la incorporació de PIP al PLA dóna lloc a materials amb valors de densitat $1,2 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, molt similar a la del PLA pur. Aquest resultat permet dir que el procés de premsat en calent produeix compòsits compactes i que la presència d'aire atrapat és molt baixa.

Taula 3-11: Resultats d'absorció d'aigua i densitat per les diferents proporcions de plomes

Mescla en volum (PLA- Ploma)	Absorció d'aigua (%)		Densitat (g/cm^3)	
	Mitjana	s	Mitjana	s
100% PLA	0,4	0,1	1,2	0,1
95% – 5%	1,3	0,3	1,2	0,1
90% – 10%	1,3	0,1	1,3	0,04
85% – 15%	1,6	0,3	1,3	0,1
80% – 20%	2,0	0,04	1,1	0,2
75% – 25%	2,0	0,2	1,2	0,1





Gràfica 3-9: Densitat (g/cm³) i absorció d'aigua (%) dels compòsits de PLA/PIP en funció del contingut de PIP.

3.5. Estudi de la compatibilitat per espectroscòpia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) i microscòpia electrònica d'escombratge (SEM)

Per tal d'observar la microestructura i valorar l'adherència efectiva entre matriu i fibra s'ha realitzat un estudi SEM dels materials compòsits de PLA/PIP. La Figura 3-3 mostra la superfície de fractura del compòsit amb un 20% v/v de PIPs a 200 i 2000 augments. Les microfotografies mostren les fibres extretes de forma neta de la matriu sense restes o porcions de matriu (PLA) adherides a la superfície de les fibres (PIP). A la superfície també s'observen alguns forats que han quedat com a conseqüència de la desaparició de la fibra durant l'esforç de tracció.

Aquestes imatges corroboren que la interacció fibra-matriu és molt menys intensa que les forces de cohesió de la matriu i que el punt de fallida es troba a la interfície PLA/PIP.

Aquests resultats corroboren la disminució de la resistència a tensió màxima quan s'incorporen plomes al material compòsit (Taula 3-10).

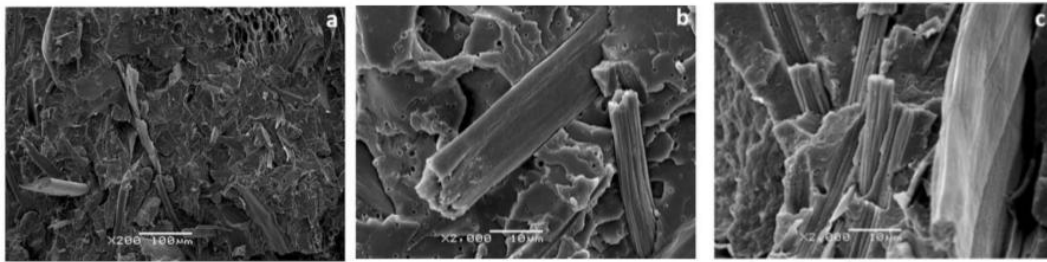


Figura 3-3: Superfície de fractura d'una placa de PLA/PIP amb un 20% v/v. (a) a 200 augments i (b,c) a 2000 augments

Per tal de validar la falta de compatibilitats suggerida per l'anàlisi microscòpic s'ha procedit a un estudi espectroscòpic dels materials composts.

A les Figura 3-4 i Figura 3-5 es mostren els espectres FTIR del PLA pur i dels composts PLA/PIP fins a un 25%. La Figura 3-4 mostra la zona de vibració de tensió de l'enllaç C-H dels materials estudiats en el rang entre 3100 i 2600 cm^{-1} . En el PLA es veuen pics del grup -OH a 3487 i 3432 cm^{-1} (no mostrat a la figura), mentre que els pics a 2995 , 2943 i 2879 cm^{-1} corresponen als enllaços C-H (-CH₃ asym, -CH₃ sym, CH modes) segons la bibliografia (Pretsch, Clerc, Seibl, & Simon, 1980).

Si comparem els espectres de les plomes de pollastre i del PLA s'observen diferències en la longitud d'ona de les vibracions dels enllaços C-H. Per les PIP els màxims estan centrats a 2950 , 2920 i 2870 cm^{-1} que son valors de longitud d'ona inferiors als observats pel PLA.

Per tant, l'increment de PIP al compost implica un canvi en la forma de les bandes i en els pics d'absorció (Figura 3-4). La Figura 3-5 conté els espectres del PLA, PIP i compost amb diferents percentatges de plomes entre els 2000 i 1400 cm^{-1} i permet veure que les longituds d'ona dels pics de màxima absorció del PLA no coincideixen exactament amb els de les PIP. En aquest cas, la banda del PLA corresponent al C=O de 1754 cm^{-1} canvia a 1739 cm^{-1} , la banda a 1644 cm^{-1} que s'assigna al C=O de l'amida incrementa la longitud d'ona quan es combina el PLA amb les plomes de pollastre. De forma anàloga, la banda del PLA a 1537 cm^{-1} corresponent a la vibració N-H que està molt oculta en el PLA passa a altres longituds d'ona a mesura que augmenta la quantitat de PIP al compost.

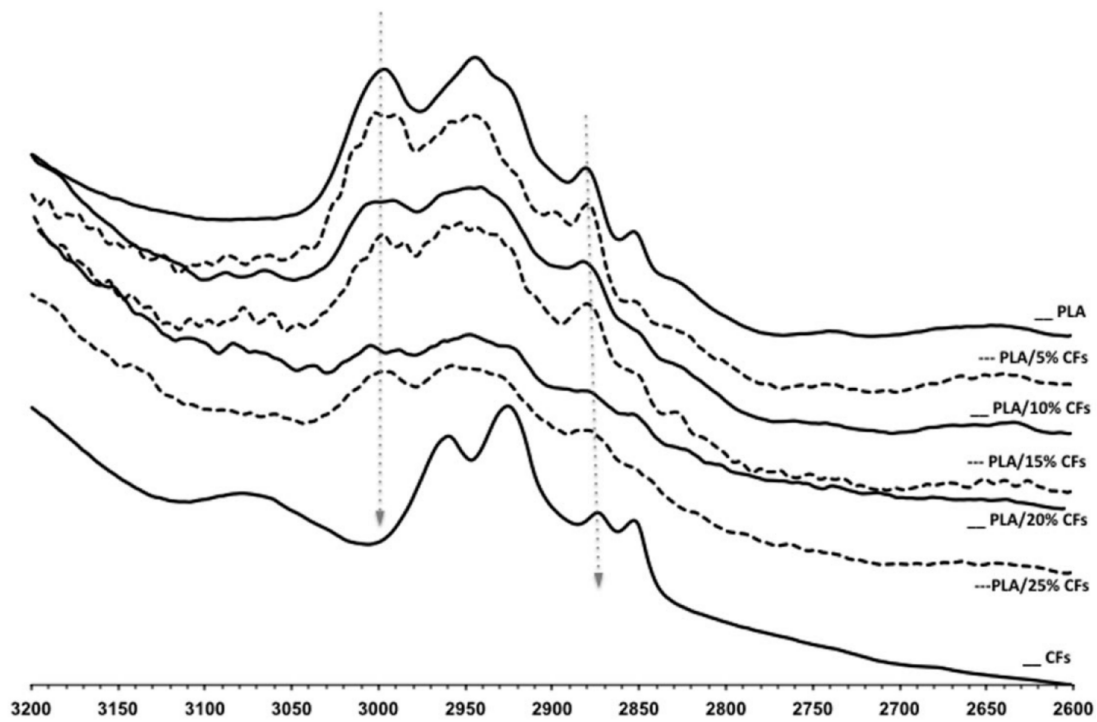


Figura 3-4: Espectre del compost PLA/PIIP amb diferents percentatges de PIP (5, 10, 15, 20 i 25%) a l'àrea de 3100-2600 cm^{-1} (C-H stretching). CF's a la figura correspon a PIP.

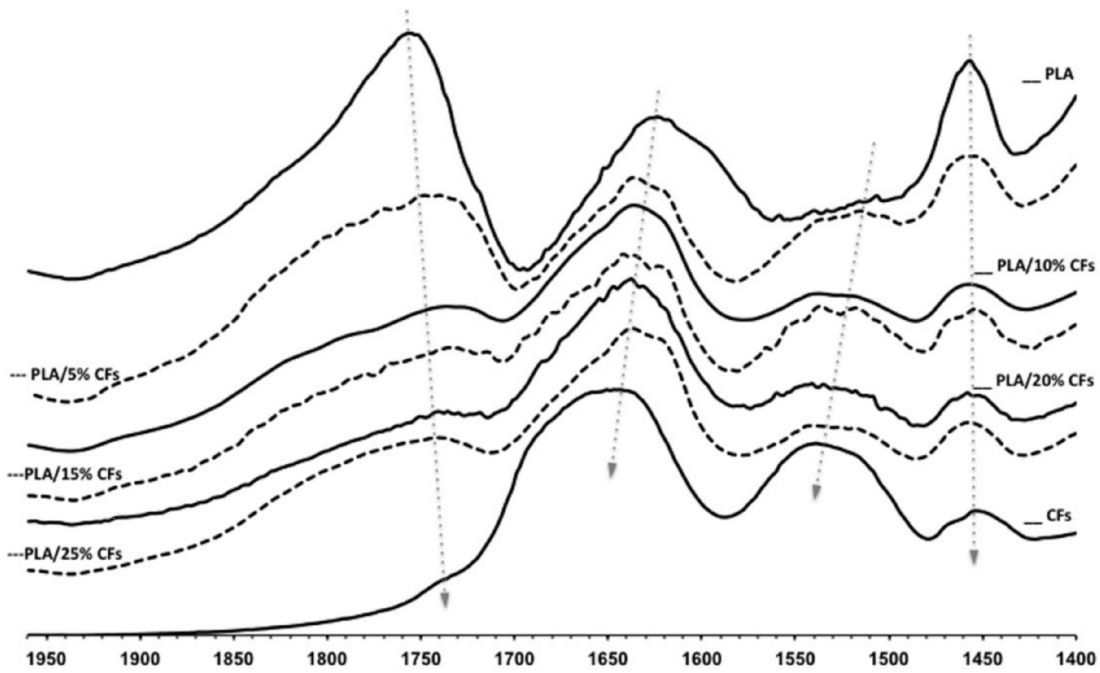


Figura 3-5: Espectre del compost PLA/PIIP amb diferents percentatges de PIP (5, 15, 25 i 35%) a l'àrea de 2000-1400 cm^{-1} (C-H stretching). CF's a la figura correspon a PIP.

Tal i com s'ha demostrat a estudis anteriors (Carrillo, Rahhali, Canavate, et al., 2013) els canvis en els espectres dels composts en comparació amb els espectres dels components per separat poden ser deguts a les forces intermoleculars dipol-dipol existents entre el PLA i la queratina (Cañavate, Pagés, Saurina, Colom, & Carrasco, 2000; Painer, PC; Coleman, MM; Koenig, 1982). Particularment, els canvis en el mode de vibració de la banda C=O del PLA a 1754 cm^{-1} , que es pot considerar una evidència de la interacció dipol-dipol intermolecular entre els grups C=O. De totes maneres, aquest tipus de forces intermoleculars no són prou intenses per proporcionar la compatibilitat desitjada i adequada entre la matriu i les PIP per tal de millorar les propietats mecàniques d'aquests materials composts.

3.6. Discussió dels resultats

A partir dels resultats presentats es pot concloure que les condicions de processament dels materials composts de PLA i PIP han de mantenir-se per sota dels 190°C de temperatura i dels 15 minuts de mescla degut a que aquests valors produeixen una degradació de les propietats del polímer i per tant de les propietats del material compost. S'ha vist que la temperatura òptima de processat ha de ser entre 170 i 180°C mantenint un temps de mescla de 5 minuts i una velocitat de 50 rpm.

Centrant-se en les propietats dels materials dissenyats, el mòdul de Young no es veu gaire afectat pel contingut de PIP observant-se un descens màxim del 8% que permet introduir PIP al material mantenint la seva rigidesa.

En canvi, la tensió a la ruptura disminueix fins a un 58% quan el contingut de PIP és del 25% i l'allargament es redueix fins a un 12% afectant negativament a la resistència a la tracció del material. Aquestes característiques negatives poden ser degudes a la baixa compatibilitat entre els components fibra-matriu. En aquest sentit les estudis de microscòpia SEM i els espectre FTIR proporcionen una visió detallada del comportament macroscòpic demostrant que existeix una interacció feble entre fibra-matriu. En aquestes condicions, la manca d'interaccions fortes poden produir efectes de concentració de tensions i fallades.

La densitat és molt propera a la del PLA pur degut a que el procés de premsat compacta el producte i es pot negligir l'efecte del contingut de PIP.

Per tant, tenint en compte tots els assajos de caracterització realitzats, es pot suggerir que els compòsits que contenen PIP no es poden etiquetar com a materials reforçats, sinó que es pot pensar en les PIP com a càrrega, reduint la quantitat de polímer necessari per fabricar l'article desitjat. Tot i això, els materials amb PLA/PIP presenten unes propietats comparables a les dels taulers de fibra de densitat mitjana (DMF) i millors que les dels taulers de partícules amb resina orgànica en les propietats mecàniques comparades.

3.7. Bibliografia

- ASTM. (1999). *ASTM D570-99. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*.
- ASTM. (2002). *ASTM D412:2002. Tensile Strength Properties of Rubber and Elastomers*.
- ASTM. (2010). *ASTM-D638:2010. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.
- Barone, J., & Schmidt, W. (2005). *Polymer composites containing keratin*. Google Patents.
<http://www.google.com/patents/US20050148703>
- Barone, J., Schmidt, W., & Liebner, C. (2005). Compounding and molding of polyethylene composites reinforced with keratin feather fiber. *Composites Science and Technology*, 65(3–4), 683–692.
- Bullions, T. A., Gillespie, R. A., Price-O'Brien, J., & Loos, A. C. (2004). The effect of maleic anhydride modified polypropylene on the mechanical properties of feather fiber, kraft pulp, polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(6), 3771–3783.
- Bullions, T. A., Hoffman, D., Gillespie, R. A., Price-O'Brien, J., & Loos, A. C. (2006). Contributions of feather fibers and various cellulose fibers to the mechanical properties of polypropylene matrix composites. *Composites Science and Technology*, 66(1), 102–114.
- Cañavate, J., Pagés, P., Saurina, J., Colom, X., & Carrasco, F. (2000). Determination of small interactions in polymer composites by means of FTIR and DSC. *Polymer Bulletin*.
<https://doi.org/10.1007/s002890050605>
- Carrillo, F., Macanás, J., Colom, X., Cañavate, J., Molins, G., Álvarez, M. D., & Garrido, N. (2012). Use of chicken feathers waste for the fabrication of composite materials. *15th European Conference on Composite Materials*, 1-8.0026.
- Carrillo, F., Rahhali, a., Canavate, J., & Colom, X. (2013). Biocomposites using waste whole chicken feathers and thermoplastic matrices. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(19), 1419–1429. <https://doi.org/10.1177/0731684413500546>
- Cheng, S., Lau, K., Liu, T., Zhao, Y., Lam, P.-M., & Yin, Y. (2009). Mechanical and thermal properties of chicken feather fiber/PLA green composites. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 650–654.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.011>

- Colom, X., Rahalli, A., Cañavate, J., & Carrillo, F. (2013). Properties and optimal manufacturing conditions of chicken feathers thermoplastic biocomposites. *Journal of Composite Materials*.
- Colom, X., Rahalli, A., Canavate, J., & Carrillo, F. (2014). Properties and optimal manufacturing conditions of chicken feathers thermoplastic biocomposites. *Journal of Composite Materials*, 49(3), 295–308.
- Finkenzstadt, V. L., Liu, C. K., Evangelista, R., Liu, L. S., Cermak, S. C., Hojilla-Evangelista, M., & Willett, J. L. (2007). Poly(lactic acid) green composites using oilseed coproducts as fillers. *Industrial Crops and Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.01.003>
- Gassner, G. (2000). *Conversion of avian feathers-waste stream to useful products: Vol. 09/266,820*.
- Gassner, G., Schimdt, W., Line, M., Thomas, C., & Walters, R. (1998). *Fiber and fiber products produced from feathers: Vol. 471,349*.
- Granta Design Limited. (2012). *CES EduPack software*.
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H. A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. A. J., & Gorrée, M. (2001). Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. In S. P. and E. (VROM) Ministry of Housing & Centre of Environmental Science (CML) (Eds.), *The Netherlands: Ministry of ...* <https://doi.org/10.1007/BF02978784>
- Hull, D. (1983). An Introduction to Composite Materials. In *Journal of Mechanical Working Technology* (Vol. 7).
- I.Organisation. (2004). *ISO 1183-1:2004. Plastics. Methods for determining the density of non-cellular plastics -- Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method*.
- Painer, PC; Coleman, MM; Koenig, J. (1982). *The Theory of Vibrational Spectroscopy and Its Application to Polymeric Materials*. John Wiley & Sons.
- Pretsch, E., Clerc, T., Seibl, J., & Simon, W. (1980). Tablas para la elucidación estructural de compuestos orgánicos por métodos espectroscópicos. In *Tablas para la elucidación estructural de compuestos orgánicos por métodos espectroscópicos*.
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D., & Ndlela, L. (2018). Optimisation of surfactant decontamination and pre-treatment of waste chicken feathers by using response surface methodology. *Waste Management (New York, N.Y.)*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.013>

4. Metodologia d'anàlisi de cicle de vida

Una vegada fixades les condicions de fabricació i mesurades les propietats mecàniques del material compost per veure que pot ser un material útil per alguns usos concrets (capítol 3), cal analitzar quin serà el seu impacte ambiental (capítol 5). Però abans d'entrar en detall en l'avaluació d'aquest impacte cal explicar detalladament la base teòrica de la metodologia utilitzada.

Com ja s'ha dit a la introducció, la nostra societat no es pot permetre la introducció al mercat de productes no ecodissenyats, és a dir, que no incloguin els paràmetres d'impacte ambiental, social i econòmic al seu procés de disseny, fabricació, ús i disposició final. L'interès creixent respecte a la protecció ambiental i a la mesura dels impactes associats als productes i processos han fet que es desenvolupin diferents mètodes (Bovea, 2012; Brezet & van Hemel, 1997; Lindahl, 2005; Luttrupp & Lagerstedt, 2006; TU Delft, n.d.) per mesurar, comprendre i disminuir aquests impactes. Una d'aquestes metodologies és l'anàlisi de cicle de vida (ACV) (Organisation, 2006a) que permet avaluar els impactes d'un producte d'una forma global (incloent totes les fases del cicle de vida del producte) de manera objectiva i quantitativa.

L'ACV, més conegut amb la seva forma anglesa com a Life Cycle Assessment (LCA), és una eina de gestió que serveix per avaluar l'impacte ambiental d'un producte, procés

o servei al llarg de tot el seu cicle de vida. D'aquesta manera es considera, bàsicament, un procediment objectiu i sistemàtic per avaluar els impactes al medi ambient i a la salut associats a un producte, procés o activitat des de la seva concepció fins a la seva eliminació. Això és concreta moltes vegades amb l'expressió “des del bressol a la tomba” o “cradle to grave” en anglès.

Segons la Society of Environmental Toxicology And Chemistry (SETAC)¹ l'ACV és:

“un procés objectiu per a avaluar les càrregues ambientals associades a un producte, procés o activitat identificant i quantificant l'ús de matèria i energia i els abocaments a l'entorn; per tal de determinar l'impacte que aquest ús de recursos i aquests abocaments produeixen al medi ambient, i per a avaluar i portar a la pràctica estratègies de millora ambiental. L'estudi inclou el cicle complet del producte, procés o activitat, tenint en compte les etapes d'extracció i processament de matèries primeres; producció, transport i distribució; ús, reutilització i manteniment, i reciclatge i disposició del residu”.

L'ACV és una metodologia que pot tenir moltes aplicacions diferents en la millora dels impactes ambientals d'un producte ja sigui identificant les etapes de màxim impacte ambiental, permetent la comparació dels impactes de diferents alternatives en el procés de producció, distribució, ús o disposició final d'un producte o en la presa de decisions en el procés de disseny del producte.

Els orígens d'aquesta metodologia es troben als anys setanta a partir de la preocupació de la societat perquè els productes i els sistemes productius es desenvolupin de manera cada vegada menys perjudicial per al medi ambient i la salut. Es va veure que la manera més eficaç d'analitzar els temes energètics dels sistemes industrials des del punt de vista ambiental era examinar tots els processos seguits per les matèries primeres, des de la seva extracció, transformació i ús, acabant amb el seu retorn a l'ecosfera en forma de residus. L'anàlisi sistemàtic no es va desenvolupar fins als anys 90, però a partir de llavors va ser adoptat ràpidament per la comunitat científica (Puig & Molins, 2010).

D'aquesta manera, l'ACV s'ha convertit en una eina adequada per a la presa de decisions cap a la sostenibilitat proveint-les de les consideracions ambientals necessàries.

¹ La SETAC és una organització que ha contribuït de forma molt significativa al desenvolupament tecnològic de l'ACV. És qui va definir per primera vegada l'ACV

D'aquesta manera un ACV:

- Proporciona una informació, el més completa possible de les interaccions del producte, el procés o l'activitat amb el medi ambient.
- Contribueix a entendre totes les conseqüències interdependents ambientals de les activitats humanes.
- Preveu conseqüències negatives en la presa de decisions i identificar oportunitats per a millores ambientals.
- Facilita el diàleg constructiu entre diferents sectors de la societat preocupats per la qualitat ambiental.

En altres paraules, l'avaluació del cicle de vida tracta de disminuir els impactes ambientals globals d'un producte, ja que té en compte cada una de les fases de la vida del producte identificant tots els impactes i evitant millores aparents que només aconsegueixen canviar un problema per un altre.

L'àmplia utilització d'aquesta eina per part del sector de l'avaluació ambiental ha generat un gran nombre de guies pràctiques sobre com realitzar una anàlisi de cicle de vida (codi pràctic SETAC, guia holandesa CML, guia NORD dels Països Baixos, EDIP a Dinamarca, US-EPA als Estats Units d'Amèrica o ILCD a Europa (Baumann & Tillman, 2004; ILCD, 2010)). A partir d'aquestes guies s'han establert diverses normes internacionals per part de la International Organization for Standardization (ISO) dins de la família de les normes ambientals ISO 14000. Aquestes normes proveeixen marcs generals per avaluar els impactes ambientals durant tota la vida d'un producte. Actualment aquestes normes són:

- ISO 14040:2006 Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Principios y marco de referencia.
- ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- ISO/TR 14047:2012 Environmental management – Life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations (exemples d'aplicació de LCI).
- ISO/TS 14048:2002 Environmental management – Life cycle assessment – Documentation format (format de les dades d'inventari).

- ISO/TR 14049:2012 Environmental management – Life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis (exemples d'aplicació d'objectius i abast i anàlisi d'inventari).
- ISO/TR 14071:2014 Environmental management – Life cycle assessment – Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006 (revisió crítica).
- ISO/TR 14072:2014 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment (guia d'aplicació ISO 14040 i 14044 a organitzacions)

Com es pot veure les normes principals són la ISO 14040 (Organisation, 2006a) que desenvolupa tot el marc conceptual sobre el que s'ha de basar un ACV i la ISO 14044 (Organisation, 2006b) que defineix els requeriments que ha de complir un ACV.

Segons aquestes normes un ACV tracta els aspectes ambientals² i els impactes³ potencials durant tot el cicle de vida d'un producte des de l'adquisició de les matèries primeres fins a la seva disposició final, passant per la producció, l'ús, el tractament final i el reciclat.

Els aspectes claus d'aquesta normativa són:

- Permetre la valoració dels aspectes ambientals des de l'adquisició de matèries primeres fins a la seva disposició com a residu, passant per totes les etapes intermitjtes de producció, transport, distribució, ús, manteniment, reutilització i reciclatge.
- Definició del grau de detall i marc temporal en els objectius i l'abast de l'estudi. És important definir, des dels inicis de l'estudi, la profunditat i el marc temporal que abastarà perquè els impactes ambientals no sempre es produeixen de forma immediata (per exemple els efectes de la toxicitat crònica).
- L'abast, les hipòtesis, la descripció de la qualitat de les dades, les metodologies i els resultats han de ser transparents. Si no queden clars tots aquests punts podem

² Segons la ISO 14001 un aspecte ambiental és un element de les activitats, productes o serveis d'una organització que pot interactuar amb el medi ambient.

³ Segons la ISO 14001 un impacte ambiental és qualsevol canvi en el medi ambient, ja sigui advers o beneficiós, com a resultat total o parcial dels aspectes ambientals d'una organització.

arribar a resultats molt diferents per al mateix sistema, i per tant fer un estudi d'ACV que no sigui extrapolable ni comparable amb d'altres estudis.

- En funció de l'aplicació es poden establir mesures de confidencialitat i propietat. Actualment hi ha moltes empreses que apliquen les anàlisis de cicle de vida al procés de disseny dels seus productes (ecodisseny). Això implica que moltes vegades els resultats no puguin ser públics per temes de competència.
- La metodologia ha d'incloure els nous avanços científics i les millores tècniques disponibles. Les dades de l'inventari cal que s'ajustin a la realitat dels processos utilitzats a cada cas en concret. En cas d'haver d'utilitzar dades genèriques cal incloure les millors tècniques disponibles en cada moment per ajustar-se a les evolucions tècniques i científiques de cada procés.
- És molt recomanable la revisió de l'ACV per un òrgan independent en cas de fer estudis comparatius públics. És important que les dades que es publiquen siguin verificades per tal de no confondre a la societat, això s'aconsegueix verificant l'estudi per una tercera part independent que certifiqui l'adequació de l'estudi a la metodologia establerta i la veracitat de les dades i dels resultats.
- No hi ha un mètode únic per realitzar un ACV, sí que hi ha una metodologia a seguir. L'ACV es basa en una metodologia amb una àmplia acceptació per part de la comunitat científica, on hi ha diversos mètodes per l'avaluació d'impactes.

L'ACV és una metodologia de caràcter dinàmic que s'estructura en quatre etapes relacionades entre elles que formen part d'un procés iteratiu en el que a mesura que s'obtenen resultats es poden modificar o millorar les dades, les hipòtesis de treball, els límits del sistema o els objectius. La qual cosa exigeix un procés de recàlcul.

Segons la norma un estudi de ACV contempla quatre fases, que s'expliquen a continuació amb més detall:

- Fase de definició d'objectius i abast (apartat 4.1).
- Fase d'anàlisi d'inventari (ICV) (apartat 4.2).
- Fase d'avaluació de l'impacte ambiental (AICV) (apartat 4.3).
- Fase d'interpretació (apartat 4.4).

La Figura 4-1 mostra les quatre fases d'estudi i la seva interrelació.

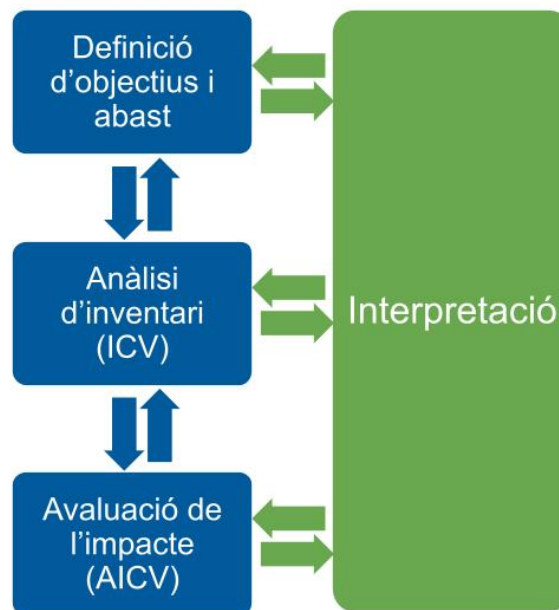


Figura 4-1: Fases d'un estudi de ACV. Font (Organisation, 2006a)

4.1. Definició de l'objectiu i abast

Un ACV es pot fer per diferents motius i per tant amb objectius diferents. Podem trobar estudis que pretenguin comparar ambientalment dos productes o serveis (assecador de mans elèctric o tovallotes de paper) i d'altres que vulguin avaluar ambientalment diverses alternatives en un mateix procés, per exemple, determinar si és ambientalment millor utilitzar polipropilè (PP) o poliàcid làctic (PLA) en un envàs alimentari concret.

L'objectiu d'un ACV ha d'establir el producte o servei a estudiar, l'aplicació prevista, les raons per realitzar l'estudi, el públic objectiu i si es preveu divulgació pública.

Així doncs, cal definir el context o l'abast de l'estudi, que inclou els límits, la profunditat i l'amplitud de l'estudi (Baumann & Tillman, 2004). L'abast ha d'incloure el sistema del producte a utilitzar, les funcions del sistema del producte, la unitat funcional, els límits del sistema, els procediments d'assignació de les càrregues ambientals, les categories d'impacte seleccionades, la metodologia d'avaluació d'impacte i la interpretació que s'utilitzarà, els requeriments de qualitat de les dades, les limitacions i hipòtesis

plantejades, el tipus de revisió crítica, en cas que n'hi hagi i el tipus i format de l'informe de l'estudi.

De tota manera cal tenir en compte que l'ACV és una tècnica iterativa i que durant les etapes posteriors potser cal modificar alguns aspectes de l'abast per tal de complir amb els objectius de l'estudi.

L'abast del sistema pot variar en funció dels objectius de l'estudi, però sempre inclourà la producció del producte. Moltes ACV són estudis globals (del bressol a la tomba o "cradle-to-grave") que tenen en compte tot el procés, des de l'extracció de les matèries primeres fins al final de vida del producte passant per les fases de producció, distribució i ús del producte. Però en altres casos, com és el d'aquest estudi, cal fer anàlisis parcials per veure si una part del sistema millora els aspectes ambientals del producte o per tenir dades per poder fer ACVs globals posteriorment. Aquests estudis (del bressol a la porta ("cradle-to-gate"), de la porta a la porta ("gate-to-gate") o de la porta a la tomba ("gate-to-grave")) inclouen una anàlisi parcial del producte en la fase concreta estudiada. En el cas dels estudis del bressol a la porta, l'abast inclou des de l'extracció de la matèria primera fins a la producció del producte. Aquests estudis són la base per fer les declaracions ambientals de producte (EPD). Els estudis de la porta a la porta ("gate-to-gate") es centren en un sol procés i moltes vegades s'enllacen per tal de fer una ACV global o del bressol a la porta.

De tots els requeriments de l'abast del sistema, la unitat funcional, els límits del sistema i els requeriments de qualitat de les dades requereixen una especial atenció i es descriuen amb més detall a continuació.

4.1.1. Unitat funcional

El punt central d'un ACV no és el producte o el procés, és el servei o funció que desenvolupa. Per analitzar l'impacte d'un producte cal identificar la seva funció (tasques de desenvolupa) i poder quantificar-la mitjançant la unitat funcional (UF) que quantifica les funcions del sistema del producte per ser utilitzada com a unitat de referència. Per tant, abans d'establir-la cal definir clarament la funció o funcions que seran objecte d'estudi del sistema. A partir d'aquí cal fixar una unitat funcional que permeti la quantificació matemàtica d'aquesta funció. La seva raó de ser és la de proporcionar una

referència a la que relacionar totes les entrades i sortides del sistema. Aquesta referència és necessària per poder comparar els resultats obtinguts.

La unitat funcional ha d'estar clarament definida i ser mesurable. A partir d'aquí es poden determinar els fluxos de referència (quantitat de producte o servei necessari per satisfer la UF) que permeten la quantificació de totes les entrades i sortides del sistema en funció d'aquesta unitat. Les comparacions entre sistemes s'han de fer sobre la base de les mateixes funcions, quantificades amb les mateixes unitats funcionals i amb els fluxos de referència corresponents a cada sistema.

Quan es vol fer algun tipus de comparació (cal recordar que només es poden comparar productes o serveis que compleixin una mateixa funció), és necessari escollir una unitat de tipus funcional, és a dir, que vagi referida a la funció que desenvolupen els productes o serveis a comparar. Llavors els productes o serveis es compararan en base a la unitat funcional. Per exemple, si estem estudiant l'ACV d'un diari, la funció seria estar informat, la unitat funcional seria, per exemple, llegir un exemplar d'un diari cada dia durant un any i el flux de referència seria tots els materials i energia necessaris per publicar, distribuir, llegir el diari en format paper i les emissions i residus generats en aquest procés (inclòs el final de vida) durant tot un any i també els recursos necessaris i emissions i residus generats per publicar, distribuir i llegir el diari en format electrònic (inclosos els dispositius electrònics necessaris per fer-ho). Un altre exemple seria el cas de diferents materials compòsits on una molt bona unitat funcional és el volum de material necessari per satisfer una determinada propietat, per exemple mecànica (material service density) (Xu et al., 2008). A la Taula 4-1 hi ha més exemples d'unitats funcionals:

Taula 4-1: Exemples d'unitat funcional. Font (Baumann & Tillman, 2004)

Producte	Funció	Unitat funcional
Envasos de beguda	Contenir i transportar beguda	Contenir 1 l de beguda
Material de decoració (pintura, paper de paret, ...)	Protegir una superfície interior	Protegir 1 m ² de paret interior durant 10 anys
Got o tassa	Contenir beguda	Contenir 200 ml de beguda per ser consumida 3 cops al dia durant 5 anys

4.1.2. Límits del sistema

Els límits del sistema defineixen quins processos estaran inclosos a l'anàlisi i quins no. Cal una identificació clara dels criteris utilitzats per establir aquests límits indicant els processos a incloure i el nivell de detall al que s'han d'estudiar. En principi s'ha d'incloure totes les entrades i sortides que siguin fluxos elementals del sistema, però no cal destinar recursos en quantificar aquestes entrades quan no portin a canvis significatius de les conclusions generals de l'estudi (European Commission et al., 2010; Guinée et al., 2001).

Els límits del sistema es trien en funció de la definició de l'objectiu i abast de l'estudi, la seva aplicació, el públic objectiu, les restriccions de dades i costos i els criteris de tall. Aquests criteris han d'estar clarament descrits i cal considerar diferents etapes del cicle de vida com: l'adquisició de les matèries primeres, les entrades i sortides del procés, la distribució i transport, la producció i ús de combustibles, electricitat i calor, l'ús i manteniment de productes, la disposició dels residus del procés i dels productes, la recuperació de productes utilitzats (incloent reutilització, reciclat i recuperació d'energia), la producció de materials secundaris, la producció, manteniment i desmantellament dels equips o les operacions addicionals, com la il·luminació i la calefacció.

Per descriure el sistema és molt útil construir un diagrama de flux que mostri els processos unitaris i les seves interrelacions (Figura 4-2). De cada procés s'ha de descriure on comença el procés unitari (recepció de matèria primera o productes intermitjos), la naturalesa de les transformacions i operacions que hi ha dins del procés i on acaba el procés (destí dels productes intermitjos o finals).

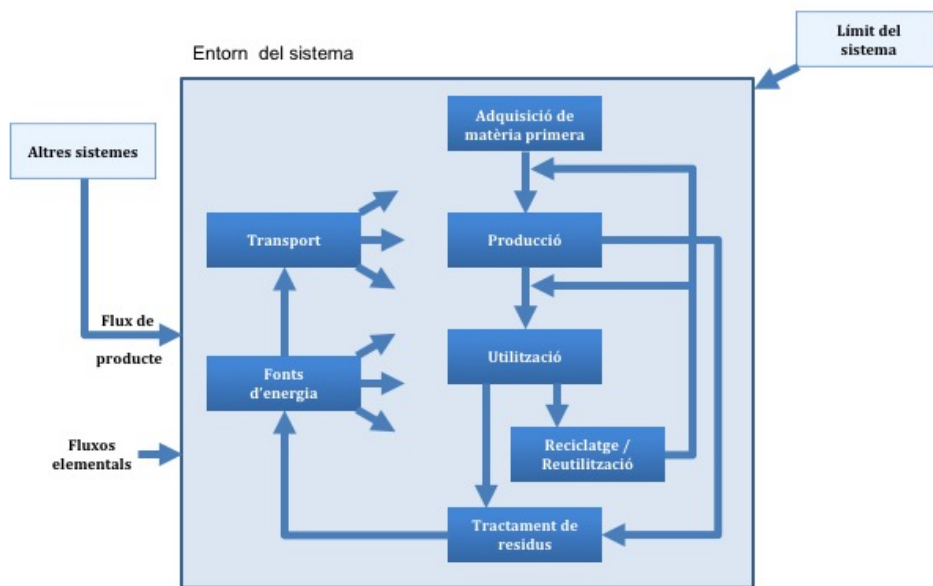


Figura 4-2: Exemple d'un sistema de producte per un ACV. Font (Organisation, 2006a)

Els criteris de tall per la inclusió inicial de les entrades i sortides i les seves suposicions han de ser definits amb claredat i a l'informe final s'ha d'avaluar el seu efecte sobre els resultats finals de l'estudi.

Alguns dels criteris de tall que es poden utilitzar són:

- **Massa:** cal incloure a l'estudi, totes les entrades que, de forma acumulativa, representin més d'un percentatge definit.
- **Energia:** aquí s'inclouen totes les entrades, que de forma acumulativa, representin un percentatge definit de l'entrada total d'energia del sistema.
- **Importància ambiental:** aquí s'inclouen les entrades que representen més d'una quantitat definida i que estan seleccionades per la seva importància ambiental.

4.1.3. Procediments d'assignació de les càrregues ambientals

En el cas que en un procés es produeixin altres productes que no corresponguin al procés estudiat cal tenir-ho en compte. Per exemple, en cas de voler fer l'ACV d'una sabata feta amb pell de vaca caldrà tenir en compte els impactes del procés de producció de la pell

que inclouen els de la cria de la vaca. Però les vaques al llarg del seu cicle de vida produeixen més productes com poden ser la llet o la seva carn (Fullana & Puig, 1997).

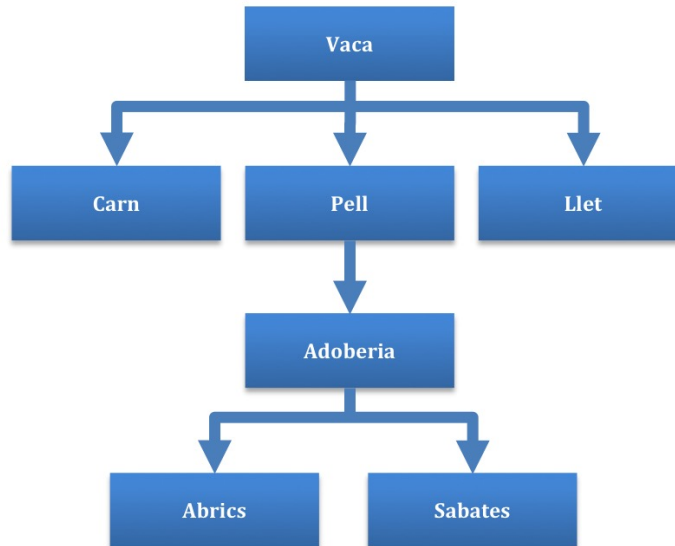


Figura 4-3: Exemple d'assignació de càrregues

La norma ISO 14044 (Organisation, 2006b) recomana que en cas de processos compartits amb altres sistemes del producte cal evitar l'assignació sempre que sigui possible, bé dividint el procés unitari en diversos sub processos o ampliant el sistema del producte per incloure les funcions addicionals relacionades amb els coproductes. En el cas anterior, implicaria estudiar els impactes associats a la producció de carn, de la pell i de la llet dins del nostre sistema. Això moltes vegades no és possible o dificulta molt el procés.

Llavors es pot fer una assignació de càrregues separant les entrades i sortides dels sistema entre els diversos productes o funcions en funció de les relacions que hi ha entre ells. Aquestes relacions poden ser de causalitat, volum, quantitat o valor econòmic. A l'exemple anterior del calçat, l'assignació de les càrregues ambientals de la granja i l'escorxador el podem fer per massa o per valor econòmic. Aquestes assignacions de càrregues han de quedar clarament justificades i explicitades a les hipòtesis de treball.

4.1.4. Requeriments de qualitat de les dades

Pel que fa a la qualitat de les dades caldrà especificar les característiques de les dades necessàries per l'estudi. L'inventari es basa en una gran quantitat de dades que provoquen certa incertesa en els resultats (Catalunya & Monturiol, 1996), és per això que cal tenir clar quins criteris de qualitat es seguiran per acceptar o no les dades i poder determinar la fiabilitat i la incertesa dels resultats. Aquest pas és important per comprendre la fiabilitat dels resultats i interpretar correctament els resultats de l'estudi.

4.2. Inventari de cicle de vida (ICV)

Després de la definició dels objectius i l'abast del sistema es procedeix a fer l'anàlisi de l'inventari de cicle de vida que quantifica les entrades i sortides (matèria i energia) del sistema a partir de la recopilació de les dades i l'aplicació dels procediments de càlcul.

En aquesta etapa cal construir un model del sistema segons els requeriments dels objectius i l'abast, que bàsicament serà un balanç de matèria i energia incomplet, perquè només es consideren els fluxos ambientalment importants del sistema (Baumann & Tillman, 2004). Però també pot incloure altres paràmetres com la utilització del sòl, el soroll o la biodiversitat afectada entre d'altres (ILCD, 2010).

Es tracta d'un procés iteratiu on a mesura que es van recopilant les dades es va aprenent més sobre el sistema i es poden quantificar nous requeriments o limitacions. Fins hi tot pot implicar la revisió de l'objectiu i l'abast de l'estudi.

És la fase més llarga i que cal realitzar amb més cura per evitar la incorporació d'errors que puguin afectar als resultats finals.

Així doncs en aquesta fase cal realitzar les següents activitats (Baumann & Tillman, 2004):

- Construcció del diagrama de flux del sistema que inclou les diferents parts del sistema i els fluxos entre elles.
- Recopilació de dades de totes les parts del sistema. Això inclou totes les entrades i sortides com energia, matèries primeres, matèries auxiliars, productes, co-productes, residus o emissions a l'aire, a l'aigua i al sòl.

- Càlcul de la quantitat de recursos i emissions del sistema en relació a la unitat funcional.

Cal arribar a fluxos de materials i energia que provinguin o vagin directament a la naturalesa, és a dir, si surten aigües residuals a depurar d'un procés cal incloure els consums deguts a aquest tractament d'aigües residuals i les emissions de contaminants que arribaran al medi fruit d'aquest procés de depuració (en forma de gasos, etc.).

Les dades recopilades s'han de validar i relacionar amb els processos unitaris a través del flux de referència definit a partir de la unitat funcional. Els valors obtinguts són els resultats de l'inventari del sistema. En el cas de l'energia cal tenir en compte les diferents fonts primàries, l'eficiència de la conversió i la distribució de l'energia, i les entrades i sortides associades a la seva generació, distribució i ús.

En aquesta etapa, s'obtenen moltes dades a tractar que es poden recopilar en un full de càlcul que ens permetrà fer l'avaluació posterior dels impactes a partir de les dades amb més facilitat. També es pot utilitzar programari específic com SimaPro (PRé Consultants, 2014), GaBi (PE International, Alemanya), OpenLCA, OneclickLCA o Umberto que faciliten molt la fase d'avaluació i interpretació posterior⁴ (Bogucarskis & Center, 2010).

Les dades recopilades a la fase d'inventari es poden classificar en dos grans grups:

- **Dades primàries** o de camp (foreground data): són les dades mesurades o recollides directament per l'estudi i que són representatives dels processos estudiats. Són dades altament específiques i acurades ja que s'han obtingut expressament per l'ACV.
- **Dades secundàries** o genèriques (background data): són dades extretes de bases de dades existents i confeccionades per altres científics de manera genèrica per processos concrets que acostumen a estar presents a molts ACVs.

Es recomana utilitzar dades primàries sempre que sigui possible, sobretot pels processos principals i secundàries quan no es tingui la opció de recopilar les dades directament, sobretot en processos auxiliars com la generació d'energia, la producció de matèries

⁴ Es pot trobar una llista més exhaustiva d'aquestes eines al web

<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/faces/tools/toolList.xhtml>

primeres, el transport o la gestió dels residus. Per exemple, en el cas d'un ACV d'un material compòsit les dades de consum i emissions degudes a la pròpia fabricació del material s'obtidrien de la pròpia empresa que el fabrica (dades primàries), però en canvi les dades de fabricació de l'envàs que contindrà el material o les dades de producció de l'energia per fabricar i transportar el material poden provenir d'una base de dades (dades secundàries). Si no es disposés de bases de dades els ACV serien, moltes vegades, inviàbles per no disposar de dades generals pels aspectes més habituals com el transport, l'energia o la gestió dels residus.

Una vegada recopilades les dades ja es pot començar amb els procediments de càlcul que inclouen la validació de les dades, la relació de les dades amb els processos unitaris i la relació de les dades amb el flux de referència de la unitat funcional. Així s'obtenen resultats per a cada procés unitari del nostre sistema.

En el cas de sistemes que produeixen més d'un producte, reciclen productes intermitjts o els propis residus cal considerar un procediment d'assignació de càrregues de les diferents entrades i sortides el sistema.

4.3. Avaluació de l'impacte de cicle de vida (AICV)

Un cop finalitzat l'ICV s'inicia la fase d'avaluació de l'impacte de cicle de vida per tal de calcular i avaluar la significació dels impactes ambientals potencials a partir de les dades obtingudes a l'inventari.

En aquesta etapa es transformen els valors de la fase d'ICV en una informació ambientalment més rellevant, com són els impactes del procés estudiat a l'entorn. Aquesta fase implica l'associació de les dades de l'inventari en categories d'impacte ambiental i l'ús de factors de caracterització per incloure els valors de l'inventari dins de cada categoria d'impacte com s'explica a continuació.

Les etapes que inclou l'AICV són (veure Figura 4-4):

- **Selecció de les categories d'impacte, indicadors de categoria i models de caracterització.** Les categories d'impacte representen els aspectes ambientals d'interès per l'estudi com pot ser l'escalfament global (GWP100), l'acidificació o la toxicitat humana. Els indicadors de categoria són els valors quantificables

d'aquestes categories (kg eq. de CO₂, pel cas d'efecte hivernacle). Els models de caracterització descriuen els mecanisme ambiental per relacionar els resultats del ICV amb els indicadors de categoria. Aquest model s'utilitza per definir els factors de caracterització que són els valors obtinguts a través de la modelització de les categories d'impacte que permeten transformar les dades de l'inventari en un valor en les unitats de l'indicador de cada categoria d'impacte. Els factors de caracterització de cada substància es calculen basant-se en models científics identificats i documentats de cadenes causa-efecte dels sistemes naturals. Si ens fixem en el cas concret de la categoria d'impacte GWP100, l'indicador de la categoria és kg CO_{2eq} i els factors de caracterització resultants de la modelització són 1 kg de CO_{2eq} per kg de CO₂, 36 kg de CO_{2eq} per kg de CH₄ i 5350 CO_{2eq} per kg de CFC-11 (CCl₃F).

- **Classificació:** Els resultats obtinguts de l'ICV s'agreguen dins de cada categoria d'impacte a la que hi tenen contribució (per exemple, el CO₂, el CH₄ i el CFC-11 s'assignaran a la categoria d'impacte GWP100).
- **Caracterització:** Implica la modelització dels resultats de l'ICV per a cada categoria d'impacte. Com que cada valor d'inventari no causa els mateixos efectes sobre el medi, s'apliquen els factors de caracterització per a cada substància. Això comporta la conversió dels resultats de l'ICV a unitats comunes dins de cada categoria d'impacte i la suma d'aquests resultats dins de cada categoria d'impacte. Per exemple, si a la fase d'ICV obtenim que el procés emet 25 kg de CO₂, 2 kg de CH₄ i 0,5g de CCl₃F, donat que els factors de caracterització per la categoria de GWP100 són 1 kg de CO_{2eq}, 36 kg de CO_{2eq} i 5350 CO_{2eq} respectivament, el valor de l'impacte ambiental per la categoria de GWP100 serà de 99,14 kg de CO_{2eq}.
- **Normalització:** Els valors de la caracterització són diferents per cada categoria d'impacte i és difícil veure'n la importància relativa sense tenir cap valor de referència. Per tant, en aquesta etapa es quantifica el valor obtingut a la caracterització en relació a un valor de referència (per exemple, l'impacte d'una persona que viu a l'Europa occidental durant 1 any) per tal de veure'n la seva rellevància. L'objectiu és entendre millor la magnitud relativa per a cada resultat de l'indicador del sistema estudiat. Pot ser d'utilitat per verificar si hi ha incoherències o comunicar la importància relativa dels resultats de cada indicador.

El resultat de l'indicador es transforma dividint-lo per un valor de referència estudiat a cada model.

- **Agrupació:** Les diferents categories d'impacte es poden agrupar en diferents conjunts. Això permet organitzar les categories d'impacte en una base nominal (com poden ser escales globals, regionals o locals) o en funció d'una jerarquia (com pot ser la seva prioritat). Degut a que l'agrupació es fa en funció de judicis de valor, diferents persones o organitzacions poden arribar a conclusions diferents a partir dels mateixos resultats.
- **Ponderació:** Els valors es poden agregar fent-ne una suma ponderada establint diferents factors numèrics que donin una importància relativa a cada categoria d'impacte. Aquesta conversió es basa en judicis de valors que poden incloure la suma dels resultats dels indicadors ponderats. Aquesta suma permet tenir un valor únic d'impacte.

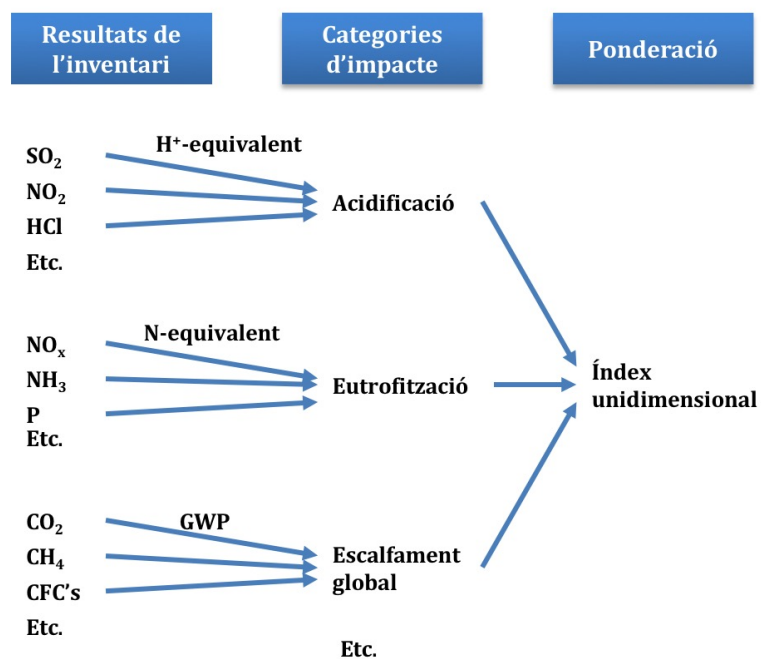


Figura 4-4: Passos en l'agregació del ACV (Baumann & Tillman, 2004)

Taula 4-2: Exemple de termes de la categoria d'impacte de canvi climàtic (Organisation, 2006b).

Categoria d'impacte	Canvi climàtic
Resultats d'ICV	Quantitat de gasos d'efecte hivernacle per unitat funcional
Model de caracterització	Model de la línia base de 100 anys del panell intergovernamental sobre el canvi climàtic
Indicador de categoria	Radiació infraroja (W/m ²)
Factor de caracterització	Potencial d'escalfament global (GWP100) pe cada gas d'efecte hivernacle (kg CO ₂ equivalents / kg de gas)
Resultat d'indicador de categoria	Kg de CO ₂ equivalents per unitat funcional
Punts finals	Escull de coral, boscos, cultius
Importància ambiental	La radiació infraroja és una dada indirecta dels efectes potencials al clima, depenent de l'absorció de calor atmosfèric integral causat per les emissions i la distribució en el temps de l'absorció de calor

En un AICV cal fer sempre la selecció de categories d'impacte, la classificació i la caracterització. En canvi, les fases de normalització, agrupació i ponderació són optatives. Cal tenir en compte que les fases d'agrupació i ponderació estan basades en judicis de valor i que impliquen la pèrdua de molta informació de l'anàlisi de cicle de vida. També introdueixen subjectivitats al sistema i per tant cal transparència per assegurar que les suposicions estan clarament descrites i informades. Per això, cal presentar el resultats obtinguts abans de l'agrupació per tal d'assegurar que les compensacions d'informació estan disponibles pels que prenen les decisions a partir dels resultats i que els usuaris poden valorar la totalitat dels resultats.

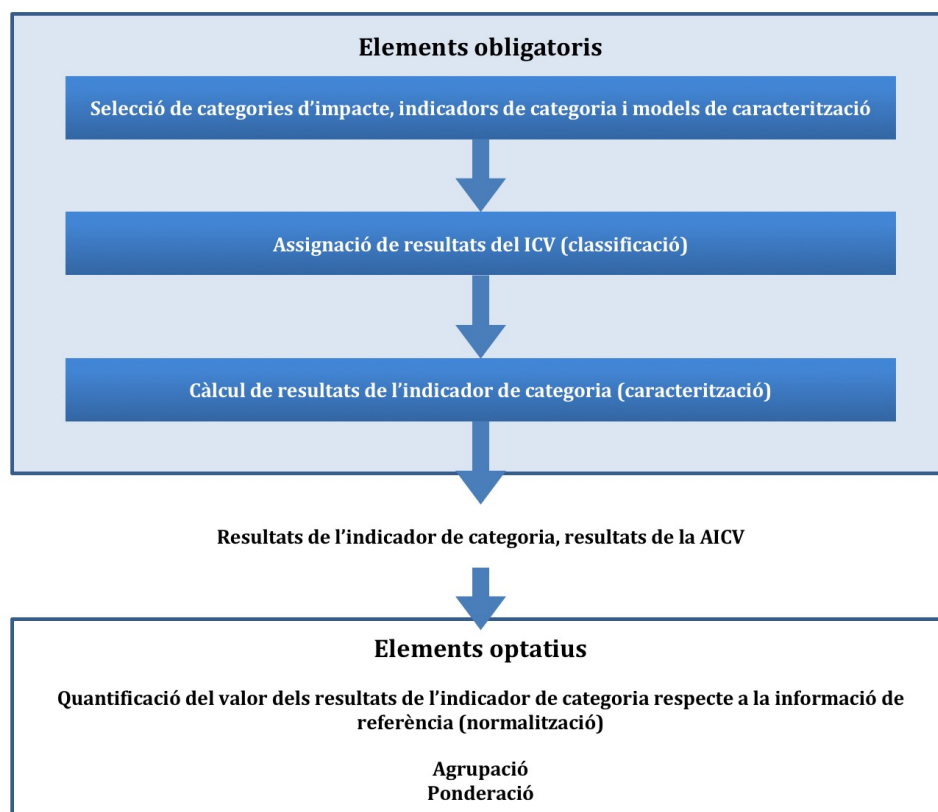


Figura 4-5: Elements de la fase AICV (Organisation, 2006a)

Aquestes etapes permeten convertir la informació de l'inventari amb molts de valors desagrupats en una sèrie de valors més fàcilment interpretables, ja que es passa de centenars de valors ambientals (emissions, recursos consumits, ...) a un nombre reduït d'impactes ambientals. La qüestió clau en una ACV és avaluar i interpretar els efectes sobre el medi d'un producte o servei. Això és molt difícil d'interpretar a partir dels resultats de l'inventari. Per exemple, si volem saber si és millor el producte A o el producte B, és impossible determinar quins components del producte generen més impacte ambiental d'entre centenars de substàncies d'un llistat que reflexa les entrades i les sortides del sistema. Per això s'estudia la contribució del conjunt de totes aquestes substàncies a una sèrie d'impactes ambientals coneguts (classificació). Amb aquest pas es redueix el nombre de variables, de centenars d'intervencions ambientals (inventari) a una desena d'impactes ambientals (caracterització). Moltes vegades aquesta reducció de paràmetres no és suficient, ja que interpretar 10 valors diferents per diverses opcions de disseny

(producte A i producte B) és complexa. Llavors es fa una valoració que consisteix en posar valors relatius als diferents impactes ambientals amb la finalitat de realitzar una suma ponderada i obtenir un únic índex per a cada un dels productes o components que estem analitzant. Així, per exemple, s'obté que el producte A genera un impacte "25" i el producte B genera un impacte de "38". En altres paraules, els resultats es poden presentar com un llistat d'inventari, una caracterització dels resultats, una suma ponderada o com un sol valor. A mesura que es van agregant dades es perd informació rellevant i introduïm incertesa, però si no s'agreguen gens no es pot valorar informació interessant entre tant detall. El nivell apropiat d'agregació depèn de quina és l'aplicació del ACV i del públic a qui va dirigit (Baumann & Tillman, 2004).

Per tal de comprendre la importància, la sensibilitat i la incertesa de les dades es possible que calguin tècniques i informació addicionals, que escullen en funció de l'exactitud i el nivell de detall necessaris per complir amb l'objectiu i l'abast del ACV.

A continuació es descriuen alguns dels mètodes d'avaluació de l'impacte més coneguts i utilitzats per escollir els factors de caracterització i ponderació, si és el cas. Tots ells intenten captar els valors de la societat i es diferencien en com s'hi aproximen (Joint Research Centre - European Commission, 2010):

- **CML 2001** (Guinée, 2002): És un mètode creat per "Centre of Environmental Science" (CML) a Holanda i proposa indicadors de punt mig que són els que es centren en un problema ambiental com l'escalfament global o l'acidificació que després causaran efectes concrets sobre el medi com l'extinció d'espècies. Analitza les categories d'impacte d'esgotament de recursos abiòtics, canvi climàtic, destrucció de la capa d'ozó, toxicitat humana, ecotoxicitat, smog fotoquímic, acidificació, eutrofització i ús de recursos. Inclou mètodes de normalització, però no d'agregació o ponderació. Els mètodes de normalització que proposa són: Holanda, Europa i el Món, prenent com a valors de referència les emissions totals de cada impacte produïdes en aquests àmbits.
- **EDIP 2003** (Environmental Design of Industrial Products) (Hauschild, M. Potting, 2005): mètode desenvolupat pel Institute for Product Development (IPU) a Dinamarca proposa factors de caracterització per les categories relacionades amb les emissions, la generació de residus i l'ambient de treball com: canvi climàtic, destrucció de la capa d'ozó, acidificació, eutrofització, smog fotoquímic,

ecotoxicitat acústica, ecotoxicitat del sòl, toxicitat humana, residus i ús de recursos. Inclou les etapes de normalització i ponderació. Tot i ser un mètode d'abast global, té definits factors per moltes regions europees, per facilitar-ne l'aplicació a diferents productes fabricats a diferents zones.

- **EPS 2000** (Environmental Priority Strategies in product development) (Steen B, 1999): desenvolupat a la universitat de Chalmers (Suècia) proporciona indicadors de punt final (indicadors que es fixen en l'efecte concret sobre el medi com l'extinció d'espècies) per ajudar als dissenyadors a triar entre dos productes a partir d'un sol valor. Els indicadors avaluats són: salut humana, capacitat de producció de l'ecosistema, reserva de recursos abiòtics, diversitat biològica, valors culturals. Està orientat a avaluar el dany causat i valorar-lo a efectes econòmics, per això l'indicador final és la unitat de càrrega ambiental ("Environmental Load Unit" o ELU) que fa referència a la voluntat de pagar per evitar els efectes adversos de l'impacte.
- **ReCiPe** (Huijbregts et al., 2017): mètode que integra els mètodes Ecoindicator-99 i el CML 2000 per tal d'incloure els indicadors de punt mig i de punt final en un sol mètode. Les categories d'impacte de punt mig incloses són destrucció de la capa d'ozó, toxicitat humana, radiació, smog fotoquímic, formació de partícules, canvi climàtic, ecotoxicitat de sòl, acidificació del sòl, ocupació i transformació del terreny, transformació del sòl natural, ecotoxicitat marina, eutrofització marina, eutrofització d'aigua dolça, ecotoxicitat d'aigua dolça, ús de combustibles fòssils, ús de recursos minerals, ús d'aigua. Posteriorment aquestes categories es ponderen per obtenir els indicadors de punt final: impacte a la salut humana, impacte a l'ecosistema i ús de recursos.

És important remarcar que l'avaluació d'impacte ambiental estudia els aspectes ambientals especificats a l'objectiu i abast de l'estudi, per tant no avalua tots els aspectes ambientals possibles. Tampoc hi ha metodologies acceptades de manera general per associar de forma coherent i exacta les dades d'inventari amb els impactes potencials específics, hi ha diferents models de categories d'impacte que es van desenvolupant i actualitzant a mesura que avança el coneixement científic, tot i que la Unió Europea treballa en l'harmonització de les categories d'impacte i els mètodes d'avaluació amb la

finalitat de fer comparables els resultats d'impacte ambiental de diferents productes i organitzacions.(European Commission, 2018)

A continuació es descriuen algunes de les categories d'impacte proposades per la metodologia CML 2001 (Guinée, 2002) que és àmpliament utilitzada per la comunitat científica i és la que s'utilitzarà en aquesta tesi.

- **Disminució de materials abiòtics:** aquesta categoria inclou el consum dels minerals extrets durant el cicle de vida estudiat i el consum de combustibles fòssils de tot el cicle de vida i es mesura en kg Sb equivalents/kg d'emissió.
- **Escalfament global:** té en compte els efectes causats per les emissions de gasos d'efecte hivernacle d'origen antropogènic. El potencial d'escalfament global es mesura seguint el model desenvolupat pel panell intergovernamental per canvi climàtic (IPCC) i els factors s'expressen amb un horitzó temporal de 100 anys (GWP100) en kg de diòxid de carboni equivalent./kg d'emissió.
- **Disminució de la capa d'ozó:** avalua la pèrdua de gruix de la capa d'ozó estratosfèrica com a resultat de les emissions de CFCs i halons que impliquen un augment de la fracció de radiacions UV-B que arriben a la superfície terrestre. El model ha estat desenvolupat per l'organització meteorològica mundial (WMO) i defineix el potencial d'esgotament de la capa d'ozó de diferents gasos en kg CFC-11/kg d'emissió.
- **Toxicitat humana:** cobreix els impactes sobre la salut humana de les substàncies tòxiques presents al medi. Els factors de caracterització es calculen tenint en compte l'origen, destí, exposició i efectes de les substàncies tòxiques. Aquesta toxicitat s'expressa com a kg de 1,4-diclorobenzè equivalents/kg d'emissió.
- **Ecotoxicitat de l'aigua dolça, ecotoxicitat marina i ecotoxicitat terrestre:** Amb aquestes categories es tenen en compte els impactes de les emissions de substàncies tòxiques sobre les aigües continentals, aigües marines i els ecosistemes terrestres respectivament. Les unitats són les mateixes que per la toxicitat humana.
- **Oxidació fotoquímica:** descriu la formació de compostos químics a partir de contaminants atmosfèrics amb l'acció del sol. Es mesura en referència als kg d'etilè equivalents/kg d'emissió.

- **Acidificació:** l'acidesa de les aigües i dels terrenys es pot incrementar degut a les deposicions àcides de l'atmosfera. Els efectes d'aquestes substàncies es mesuren com a potencial d'acidificació en kg de SO₂ equivalent/kg d'emissió.
- **Eutrofització:** és la conseqüència de l'increment de la concentració de nutrients a l'aigua o al sòl, que porta a una reducció de la biodiversitat de l'ecosistema. La unitat de referència són els kg de fòsfor equivalents/kg d'emissió.

Cal remarcar que hi ha altres mètodes d'avaluació de l'impacte que defineixen altres categories d'impacte com: olor, soroll, radiació, accidents, consum de recursos biòtics o fluxos econòmics, que no es detallen aquí degut a que no seran avaluats en aquesta tesi.

4.4. Interpretació

La fase d'interpretació és la fase final del ACV i combina les dades obtingudes a l'anàlisi d'inventari (ICV) amb els resultats de l'avaluació d'impacte (AICV) amb la finalitat d'arribar a conclusions que permetin prendre decisions. És important que aquestes conclusions siguin coherents amb l'objectiu i l'abast, que s'expliquin les limitacions de l'estudi i que es proposin recomanacions.

Per tant, aquesta fase ha d'identificar els aspectes ambientals més significatius basats en els resultats de l'avaluació del cicle de vida, ha de verificar les anàlisis de sensibilitat i la coherència dels resultats i ha d'incloure les conclusions finals, limitacions i recomanacions de l'estudi.

Cal remarcar que els resultats tenen un enfoc relatiu i que indiquen efectes ambientals potencials. Això vol dir que no prediuen els impactes reals en els punts finals de cada categoria ni si es sobrepassen els límits de seguretat i risc per la població i l'ecosistema.

Els resultats de la interpretació ofereixen una lectura comprensible, completa i coherent dels resultats obtinguts i porten a un procés iteratiu de revisió i actualització de l'abast, la naturalesa i la qualitat de les dades recopilades que faciliten la presa de decisions a partir de l'objectiu i abast de l'estudi.

4.5. Informe del ACV

Com ja s'ha anat dient durant aquest capítol cal documentar amb claredat i transparència totes les etapes de l'ACV. Això comporta redactar un informe complet, exacte i sense biaixos amb un llenguatge adequat pel públic a qui va adreçat l'ACV. Segons la ISO 14044:2006 l'informe ha de considerar en primer lloc aspectes generals com l'autor de l'estudi, qui l'encarrega, la data de realització. A continuació ha de descriure detalladament les diferents fases de l'ACV, és a dir, explicar l'objectiu indicant les raons per realitzar l'estudi, les seves possibles aplicacions i el públic objectiu. Dins de l'abast cal remarcar la funció, unitat funcional i els límits del sistema. Pel que fa a l'ICV ha d'incloure els procediments de recopilació de dades, la descripció dels processos unitaris, els procediments de càlcul i validació de les dades, l'anàlisi de sensibilitat i els procediments d'assignació. Respecte a AICV s'ha d'indicar clarament les categories d'impacte i indicadors considerants justificant -ne la seva elecció, la descripció dels models de caracterització utilitzats, els procediments, càlculs i resultats de l'AICV i la seva relació amb els resultats de l'ICV, les limitacions d'aquests resultats i els judicis de valor utilitzats amb la justificació de la seva inclusió a l'estudi.

La part dedicada a la interpretació del cicle de vida ha de contenir els resultats, les suposicions i limitacions, l'avaluació de la qualitat de les dades i ha de ser transparent en temes de judicis de valors, justificacions i opinions dels experts.

En el cas que sigui aplicable una revisió crítica cal indicar el nom i filiació dels revisors, adjuntar els seus informes de revisió i les respostes a les seves recomanacions.

4.6. Revisió crítica

La revisió crítica és necessària quan es volen recolzar comparacions basades en ACV, degut a que és probable que la seva aplicació afecti a parts externes del ACV. També contribueix a augmentar la credibilitat de l'estudi.

Consisteix en la verificació de l'acompliment dels objectius del ACV pel que fa a la metodologia, requeriments de les dades, d'interpretació, d'informació i de coherència.

La revisió crítica ha d'assegurar que la classificació, caracterització, normalització, agrupació i ponderació són suficients i estan documentades per tal de poder realitzar la

fase d'interpretació. La persona encarregada de la revisió ha de tenir una experiència tècnica i científica apropiada.

4.7. Bibliografia

- Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The hitch hiker's guide to LCA :an orientation in life cycle assessment methodology and application*. Studentlitteratur.
- Bogucarskis, K., & Center, J. R. (2010, May). *LCA tools, service and data*.
- Bovea, M. D. (2012). A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 61–71.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.012>
- Brezet, H., & van Hemel, C. (1997). *Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption*. UNEP Ed.
- Catalunya, & Monturiol, F. N. (1996). *Iniciació a l'avaluació del cicle de vida*. Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient. Direcció General de Qualitat Ambiental.
- European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance* (EUR 24708 EN, Ed.; First, Vol. 1). Publications Office of the European Commission. <https://doi.org/10.2788/38479>
- European Commission. (2018). *European Platform on Life Cycle Assessment*. European Commission Website. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>
- Fullana, P., & Puig, R. (1997). *Análisis del Ciclo de Vida* (Vol. 1). Rubes Editorial, S.L.
- Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment*. Kluwer Academic Publishers.
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H. A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. A. J., & Gorrée, M. (2001). Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. In S. P. and E. (VROM) Ministry of Housing & Centre of Environmental Science (CML) (Eds.), *The Netherlands: Ministry of ...* <https://doi.org/10.1007/BF02978784>
- Hauschild, M. Potting, J. (2005). *Spatial differentiation in life cycle impact assessment: the EDIP2003 methodology*.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2).
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

- ILCD. (2010). ILCD Handbook - General guide on LCA - Detailed guidance. *Constraints*, 15.
- Joint Research Centre - European Commission. (2010). *ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment*.
- Lindahl, M. (2005). Designers' utilization of and requirements on design for environment (DfE) methods and tools. *Proceedings - Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Eco Design 2005, 2005*. <https://doi.org/10.1109/ECODIM.2005.1619207>
- Luttropp, C., & Lagerstedt, J. (2006). EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, 14(15–16). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.022>
- Organisation, I. S. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework: Vol. Norma ISO*.
- Organisation, I. S. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines: Vol. Norma ISO*.
- PRé Consultants. (2014). *SimaPro 8.0 Life Cycle Assessment Software Package (8.0)*. PRé Consultants. www.pre.nl
- Puig, R., & Molins, G. (2010). Anàlisi de cicle de vida (ACV). Herramienta de gestión ambiental. In *Master en energia para el desarrollo sostenible. Módulo 9. Evaluación de impacto y gestión económica (Vol. 4)*. Cátedra Unesco de Sostenibilidad.
- Steen B. (1999). *A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS)*.
- TU Delft. (n.d.). *EcoDesign strategy wheel*. Retrieved November 11, 2020, from http://wikid.io.tudelft.nl/WikID/index.php/EcoDesign_strategy_wheel
- Xu, X., Jayaraman, K., Morin, C., & Pecqueur, N. (2008). Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1–3), 168–177.

5. Aplicació del ACV a la producció de plaques de plomes de pollastre i PLA

A continuació es presenta l'ACV realitzat al un nou material compòsit fet amb plomes de pollastre (PIP) i poliàcid làctic (PLA) descrit i definit al capítol 3. Actualment hi ha molts estudis publicats sobre materials compòsits biodegradables centrats en estudis tècnics (propietats mecàniques, biodegradabilitat, etc.) però sense aprofundir en la determinació de l'impacte ambiental en particular (J. Barone, 2009; J. R. Barone & Schmidt, 2006; Mohammed et al., 2021; Plackett et al., 2003; Wang et al., 2020; Wool & Hong, 2005; Wrzesniewska-Tosik et al., 2007). Tot i que, a priori, pugui semblar que la combinació d'un residu amb un plàstic biodegradable porti a un material amb poc impacte ambiental és important analitzar-ho i comprovar-ho de forma científica i optimitzar la fabricació del material per generar el mínim impacte ambiental possible. Cal remarcar que a la bibliografia també es troben anàlisis ambientals de materials compòsits biodegradables que ens ajuden a veure, en cada cas, quins són els beneficis ambientals del material estudiat si és que en té (Baillie, 2004; Corbiere-Nicollier et al., 2001; Joshi et al., 2004; Mahalle, 2014; Shanmugam et al., 2021; Wang et al., 2020; Wotzel et al., 1999). La majoria d'aquests estudis es centren en materials compòsits amb fibres biodegradables

d'origen vegetal i destaquen la necessitat de fer estudis d'impacte ambiental basats en cicle de vida de cada material de forma individual, ja que els impactes són diferents en cada cas.

És per aquest motiu que aquest treball analitza l'impacte ambiental del material compòsit fet amb poliàcid làctic (PLA) i plomes de pollastre (PIP) descrit al capítol 3, utilitzant la tècnica de l'anàlisi de cicle de vida (ACV) que s'ha descrit amb detall al capítol 4 d'aquesta tesi.

5.1. Definició de l'objectiu

Aquest estudi d'anàlisi de cicle de vida té dos objectius principals:

- Determinar i analitzar els impactes ambientals del material compòsit fet a partir de PIP i PLA. Contretament s'analitzarà el compòsit format per diferents percentatges de plomes de pollastre des del 0 al 35% de PIP al material. S'ha limitat a aquests percentatges degut a que un percentatge de plomes superior al 25% dificulta molt la manufactura del compòsit i el material resultant té unes propietats de resistència a la tracció molt limitades tal i com s'ha explicat al capítol 3. En aquest apartat s'ha pogut veure com l'addició de plomes de pollastre al PLA porta a l'obtenció d'un material compòsit amb un mòdul de Young i una deformació a la ruptura similar al del PLA pur, en canvi el material pateix una gran disminució de la resistència i la deformació a tensió màxima i també de la resistència a la ruptura. L'absorció d'aigua augmenta amb l'addició de plomes al material i en canvi la densitat presenta poques diferències. D'aquesta manera els impactes ambientals (IA) del material compòsit es compararan amb els IA del PLA pur per veure els potencials beneficis ambientals de la introducció de PIP al nou material.
- Comparar els IA potencials dels diferents processos d'estabilització i desinfecció de les PIP que és una etapa preliminar crítica per tal de poder fabricar la placa de material compòsit.

5.2. Abast

Per tal de delimitar l'abast de l'ACV, es descriu a continuació el sistema per conèixer la importància de cada procés i fixar la funció i unitat funcional de l'estudi. Tot seguit s'especifiquen els límits del sistema per tal de quantificar els impactes ambientals significatius i finalment es presenta la metodologia d'impacte a utilitzar, les categories que s'avaluaran, la qualitat de les dades i es plantegen les hipòtesis de treball.

5.2.1. Descripció del sistema a analitzar

Tal i com s'ha definit als objectius, aquesta ACV es centra en els impactes ambientals derivats de l'obtenció d'un material que després tindrà diferents usos en funció de la seva aplicació final en un producte concret. Per tant, aquest estudi es basa en l'obtenció d'una placa de material compòsit de PIP i PLA de dimensions 184x184x2,2 mm.

El procés de fabricació d'aquesta placa es pot dividir en 3 grans etapes principals que consisteixen en:

1. Estabilització, rentat i desinfecció de les PIP.
2. Trituració de les PIP.
3. Fabricació de la placa de material amb plomes i PLA.

La Figura 5-1 mostra de forma esquemàtica els processos principals de cada etapa que s'inicia amb l'obtenció de les plomes de pollastre de l'escorxador i acaba amb la placa de material compòsit. Els següents paràgrafs estan dedicats a l'explicació detallada de cada etapa principal.

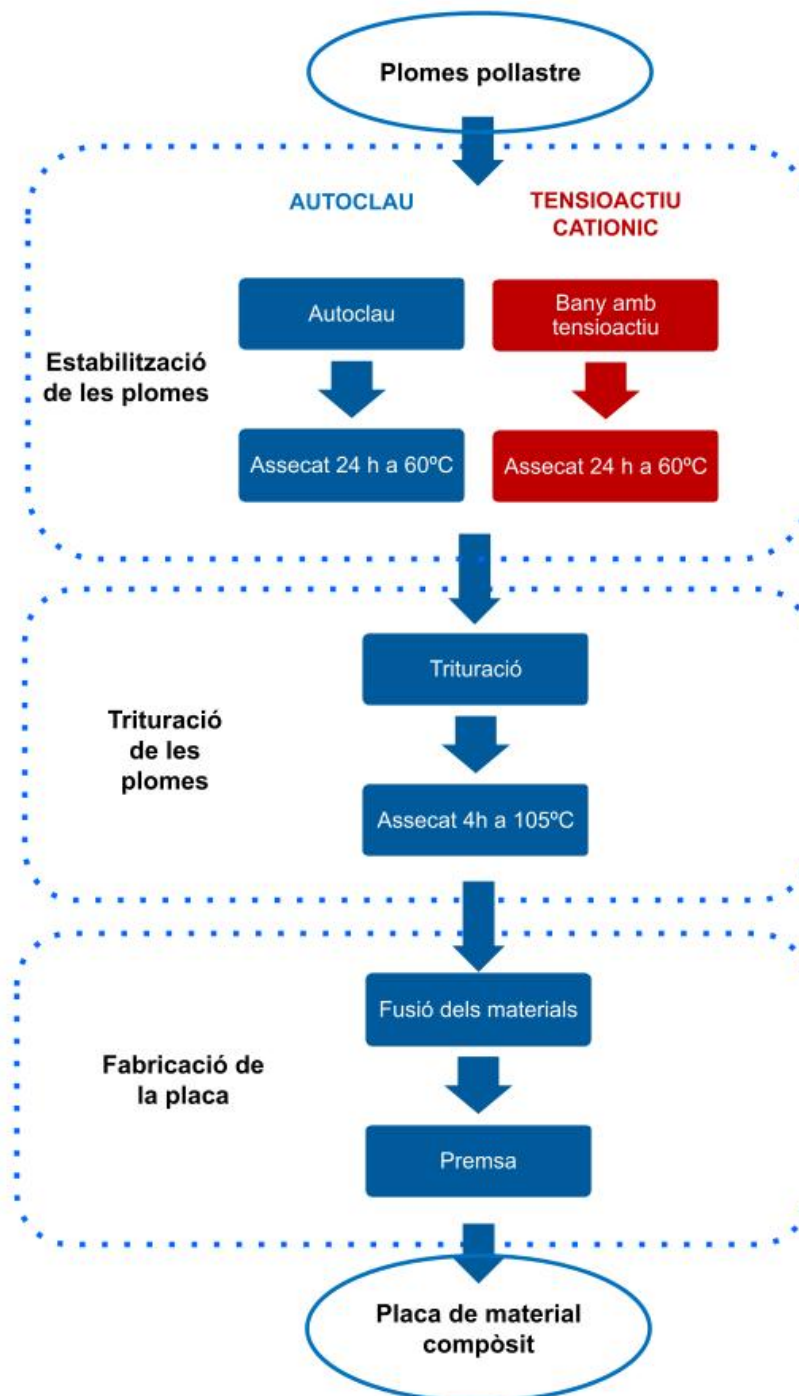


Figura 5-1: Procés de fabricació de la placa de material compost PLA/PIP

5.2.1.1. Estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre

Les PIP són residus sense valor econòmic de la indústria del pollastre que es generen als escorxadors. Després de sacrificar l'animal, hi ha un procés per extreure les plomes del

pollastre que les deixa caure en un canal que conté altres materials de rebuig com sang, greix, pell, femta i aigua (González-García et al., 2014; Tesfaye et al., 2018). Degut a que tots aquests residus es recullen de forma conjunta, les plomes de pollastre recollides als escorxadors estan contaminades amb sang, restes intestinals i àcids grassos que fan que siguin un bon hàbitat pels microorganismes (veure Taula 5-1), que inicien ràpidament la descomposició de les plomes i suposen un perill potencial per a l'ésser humà.

Taula 5-1: Contaminació bacteriana dels residus de plomes de pollastre (Tefsaye et al., 2018)

Tipus de bactèria	(Cfu/cm ² /cm ³)
Recompte total de bactèries	69457
Enterococci	184,5
Bactèries Coliformes	0,9
Bactèries sulfatoreductores	179,1

Per tant, és necessari un procés de desinfecció i estabilització de les plomes abans de poder ser valoritzades i utilitzades com a material tècnic tal i com queda descrit a la normativa SANDACH (Ministerio de Agricultura, 2007). Cal desenvolupar tecnologies per descontaminar les PIP i transformar-les en un material segur i estable sense canviar-ne la composició i estructura (Tefsaye et al., 2018). A la bibliografia consultada s'han trobat diverses tecnologies per estabilitzar les PIP basades en el rentat de les plomes amb solvents orgànics, el rentat amb tensioactius o el tractament tèrmic (Gassner, 2000; Gassner et al., 1998). Un repàs d'aquests procediments fa plantejar-se la utilització d'un procés d'estabilització amb tensioactiu catiónic tipus benzalconi com a alternativa al procés tèrmic d'estabilització suggerit per la normativa SANDACH.

És important recordar que les plomes a tractar provenen d'un gestor de residus autoritzat que les ha recollit dels escorxadors i que són transportades al laboratori en bosses industrials d'uns 15 kg aproximadament. Degut a la impossibilitat de tractar aquest volum de plomes amb la celeritat necessària per evitar-ne la descomposició, les plomes han estat congelades (-18°C) en un congelador convencional (Carrefour Home CCH150W-14, França) immediatament per evitar el creixement bacterià i conservar-ne les propietats. Les plomes s'han descongelat introduint-les a una nevera a 4°C durant 12 hores i per sotmetre-les immediatament a un tractament d'estabilització. Aquest procés de

congelació i descongelació no s'ha tingut en compte alhora de fer l'estudi d'impacte ambiental, ja que en un procés industrial d'estabilització no serà necessari.

5.2.1.2. Estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre: tractament amb autoclau

Aquest és el procés suggerit a la normativa SANDACH i consisteix en un tractament amb vapor d'aigua a 135° durant 20 minuts per assegurar la desinfecció del material i la seva estabilització (Tsfaye et al., 2018). A continuació cal un procés d'assecat de les plomes que, a nivell de laboratori, s'ha fet dins d'una estufa a 60°C durant 24h.

Així doncs en primer lloc s'omple el tanc de l'autoclau amb aigua destil·lada fins a cobrir les resistències de l'autoclau (8L), a continuació es col·loquen les plomes dins d'una estructura d'acer inoxidable que permet una bona circulació del vapor d'aigua a tota la superfície de les plomes. Aquesta estructura és la que s'introdueix a l'interior de l'autoclau. Després es regula la temperatura (135°C) i el temps (20 min). Aquest temps correspon a l'interval en el que l'autoclau es manté a 135°C, tot i que el cicle de funcionament de la màquina és més llarg, degut a que es requereix d'un temps per arribar a les condicions estacionaries de treball i de més temps per tornar a les condicions de pressió i temperatura que permetin obrir l'autoclau.

Les plomes surten d'aquest procés tèrmic amb un nivell d'humitat elevat que obliga a realitzar un cicle d'assecat dins d'una estufa de convecció natural (DIGIHEAT) amb capacitat de 52 litres. El cicle d'assecat ha estat de 24h a una temperatura de 60°C, temps suficient per tenir pes constant sense que es degradin les plomes. Cal tenir en compte que en un procés industrial de rentat de les plomes s'utilitzarien altres mètodes més eficaços com equips d'assecat industrial a gran escala per tal d'eliminar l'aigua del material. Per aquest motiu, en fer l'inventari del procés no s'ha tingut en compte el consum d'energia de l'estufa i s'ha calculat l'energia teòrica que caldria per evaporar l'aigua de les plomes tenint en compte la seva capacitat calorífica (C_p) obtinguda de forma experimental per Calorimetria Diferencial d'Escombratge (DSC), obtenint un valor de C_p de 1,31 kJ/kg·K i el seu contingut en aigua determinat experimentalment que és del 40% (Macanás et al., 2011). El detall del balanç energètic es pot trobar a l'apartat d'inventari de cicle de vida d'aquest document (5.3.1).

5.2.1.3. Estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre: tractament amb tensioactiu catiònic

A partir de l'estudi bibliogràfic s'ha proposat un mètode alternatiu d'estabilització de les plomes amb tensioactiu catiònic que consisteix en un rentat amb una solució de tensioactiu basat en clorur de benzalconi (TETRANYL BC-80 de la marca KAO) amb una concentració de 0,7% v/v (0,965g/ml). En aquest cas, les plomes són submergides dins un bany de tensioactiu (proporció de bany aigua/PIP de 40:1, seguint les indicacions de les patents) durant 1 hora amb agitació. Per aconseguir aquestes condicions, el rentat es fa amb una màquina LINITEST ORIGINAL HANAU que permet condicions controlades i reproduïbles. Aquesta màquina disposa d'un capçal per 12 tubs numerats de 100 ml cada un. L'equip gira a velocitat constant amb els tubs submergits en un bany d'aigua per tal d'assegurar les mateixes condicions per a totes les mostres.

El procediment de rentat s'inicia amb la introducció de 2,5 g de plomes brutes i 100 ml de solució de rentat en cada tub per mantenir la relació de bany 40:1. A continuació es col·loquen els tubs al carrusel de l'equip de rentat i es posa en funcionament durant 1h a temperatura ambient. Passat aquest temps es filtra el contingut de cada tub i es renten les PIP amb 500 ml aigua desionitzada fins a eliminar el tensioactiu. Finalment s'assequen les plomes en una estufa a 60°C durant 24h (les mateixes condicions que del rentat amb autoclau) i es deixen al dessecador per tal de ser triturades posteriorment.

5.2.1.4. Trituració de les plomes de pollastre

Per conformar el material compòsit cal triturar les PIP perquè tinguin una granulometria adequada i la mescla pugui ser homogènia. Per aquest procés s'utilitza una trituradora tipus molí de fulles (RETSCH model SN 100) amb una potència de trituració de 2200W. Les plomes es trituren fins a una mida màxima de 1mm i posteriorment es tornen a assecar per eliminar les restes d'humitat que contenen.

El procés detallat de trituració implica omplir el dipòsit de la trituradora amb les plomes a triturar, aixecar l'èmbol per tal de triturar tota la ploma del dipòsit amb el filtre de 1 mm. Posteriorment es recull la ploma triturada del recipient col·lector i s'asseca a 105°C durant 4 hores. Aquest segon assecat de les plomes permet eliminar qualsevol resta

d'humitat i aigua provinent de la trituració o de l'entorn. Aquest procés és necessari degut a que per fer el material compòsit la ploma ha d'estar totalment exempta d'humitat.

5.2.1.5. Fabricació de la placa de material compòsit

Per a la fabricació de la placa s'introdueix la PIP i el PLA a una mescladora i posteriorment es premsa el material obtingut per formar la placa de compòsit.

Per tal d'obtenir un material sense bombolles, és molt important que tant la ploma com el PLA estiguin exempts d'humitat, per aquest motiu les PIP són assecades després de la seva trituració (4h a 105°C) i el PLA també és assecat abans de la fabricació de la placa (4h a 70°C). Aquesta operació evita l'aparició de bombolles al compòsit obtingut degudes a la formació de vapor d'aigua durant el processat provinent de la humitat dels materials utilitzats.

Amb els dos materials exempts d'humitat és procedeix a la seva mescla amb la proporció definida per cada placa (fins a un 25% en volum de PIP) en una mescladora de doble cargol rotatiu de la marca BRABENDER (model Plastograph) tipus W 50 EHT PL (Brabender® GmbH & Co. KG, Germany). Les condicions de treball definides són d'una temperatura de 180°C durant 5 min a 50 rpm (J. Cañavate et al., 2015) tal i com s'ha explicat amb més detall al capítol 3 d'aquesta tesi. El primer pas alhora de fer la mescla és fixar les condicions de treball al programa WinMix i esperar a que la màquina assoleixi les condicions de treball definides. A continuació s'introdueix el PLA (material matriu) i s'espera a que es fongui per afegir les plomes triturades. Passat el temps de processat definit (5 minuts), s'extreu la mescla dels cargols per posar-la al motlle. Degut a que la mescladora utilitzada només admet 60g de material, és necessari repetir el procés dues vegades per tal d'obtenir suficient material per fer la placa.

El segon pas és el premsat del material a alta temperatura i pressió per tal de formar la placa de 184x184x2,2 mm. Aquest premsat es realitza amb una premsa de plats calents (Collin model P 200E). Les condicions de treball fixades han estat una temperatura de 180°C, un temps de 5 minuts i una pressió de 100 Pa seguit de 5 minuts de refrigeració amb aigua freda a 100 Pa (Garrido et al., 2011).

5.2.2. Funció i unitat funcional (UF)

Després de descriure detalladament el sistema, per seguir amb l'avaluació de l'impacte de la fabricació del material és important definir clarament la funció del sistema, sobretot per tal de poder fer comparacions amb altres estudis o utilitzar aquest estudi per avaluar l'impacte ambiental d'una peça fabricada amb aquest material. Tal i com s'ha explicat anteriorment al capítol 4.1.1, la UF es refereix a la base de càlcul sobre la que es relacionaran les dades de l'inventari de cicle de vida per tal d'assegurar que les diferents alternatives són comparades amb una base comuna. Conseqüentment cal que estigui basada en la funció del producte i no en el producte físic en sí.

En el cas d'aquest estudi que té com a objectiu la comparació dels impactes deguts a diferents processos d'estabilització de les plomes de pollastre i la determinació dels impactes potencials de l'ús del material compòsit amb diferents percentatges de plomes, la UF no cal que estigui basada en una aplicació final concreta. Però tampoc es pot definir la UF únicament en funció de la massa del material, ja que en cas d'utilitzar diferents materials per la mateixa funció la massa pot ser diferent. (Cooper, 2003). Xun Xu (Xu et al., 2008) proposa definir la unitat funcional basant-se en el volum de material necessari per satisfer unes propietats mecàniques determinades ("material service density").

Així, en aquest cas, per a la definició de la UF s'ha decidit basar-se en l'obtenció d'un material amb unes propietats mecàniques que permetin la seva utilització per a la fabricació de peces concretes i que puguin substituir a peces de material plàstic amb un major impacte ambiental.

Per tant, la UF s'ha definit com "obtenció d'una placa de material compòsit de dimensions 184 x 184 x 2,2 mm amb un Mòdul de Young superior a 2500 MPa". S'ha definit en volum i no en massa degut a que la densitat de les plomes ($<1 \text{ g/cm}^3$) (Macanás et al., 2011) i del PLA ($1,25 \text{ g/cm}^3$) són diferents i per tant els materials compòsits obtinguts també podrien tenir una densitat diferent i no es poden menystenir les diferències de densitat dels materials compòsits alhora d'avaluar-ne el seu impacte ambiental (Joshi et al., 2004).

5.2.3. Límits del sistema

Abans de definir els límits del sistema és important remarcar quins processos han estat inclosos dins del sistema estudiat. Aquests processos són:

- La producció de les matèries primeres per fabricar la placa de material compòsit i el seu processat fins a obtenir la placa.
- La gestió dels residus generats durant el procés de fabricació i en l'obtenció de les matèries primeres.
- La producció de l'energia i materials auxiliars consumits durant el procés.

Els límits del sistema determinen quines parts del cicle de vida del producte i quins processos seran estudiats dins de sistema i quins en quedaran fora. Per aquesta tesi en concreta s'han fet les següents consideracions:

- Els límits dels subsistemes d'obtenció de les matèries del procés de fabricació, de l'energia i de l'aigua corresponen als considerats pels autors de les bases de dades utilitzades per considerar-ne els impactes.
- Per les aigües residuals dels diferents tractaments d'estabilització, s'ha considerat el seu abocament a la natura i s'han inclòs a la fase d'inventari.
- Queden fora dels límits del sistema els impactes associats a la construcció de les infraestructures i la maquinària necessaris per portar a terme el procés degut a la dificultat d'obtenir aquestes dades per la falta d'instal·lacions actuals on en produeixi aquest material.
- Els processos relacionats amb el transport de les PIP no han estat considerats perquè la planta de tractament ha d'estar localitzada prop de l'escorxador degut a la seva ràpida degradació abans de ser estabilitzades.
- El procés de fabricació del tensioactiu catiònic s'ha considerat menyspreable enfront de l'impacte de les matèries primeres utilitzades en la seva fabricació.
- Tot i que la indústria de producció de carn de pollastre té un gran impacte ambiental i que les plomes suposen aproximadament 7% pel pes de l'animal viu els impactes ambientals de l'obtenció de les plomes de pollastre no han estat considerats (Bengtsson & Seddon, 2013; Cesari, 2017; González-García et al., 2014; Kalhor, 2016; Ministerio de Agricultura, 2007; Prudêncio da Silva et al., 2014a; Skunca, 2018).

Aquests impactes no han estat inclosos dins del sistema estudiat degut a que, tal i com indica el ILCD Handbook publicat pel Joint Research Center de la Comissió Europea (European Commission et al., 2010), és crucial determinar les relacions causals entre cada flux no funcional i els co-productes com a primer criteri per l'assignació de càrregues.

Els productes amb un valor negatiu al mercat al final de la seva vida útil, és a dir, pels que cal pagar una taxa de tractament de residus per a la seva eliminació, però que com a conseqüència d'aquest tractament s'obté un producte valuós són considerats co-productes.

Les plomes de pollastre són un co-producte de la cria del pollastre ja que són residus de la producció de carn de pollastre sense un valor econòmic (Ministerio de Agricultura, 2007) que cal tractar com a residus i on no hi ha cap relació causal o econòmica entre la cria del pollastre (flux no funcional) i les PIP.

A partir d'aquesta premissa, quina és la càrrega ambiental associada a aquest co-producte? La Comissió Europea proposa seguir el mètode de la petjada ambiental del producte (PEF) (Zampori & Pant, 2019) per tal d'avaluar el rendiment ambiental d'un producte. La PEF és una metodologia basada en ACV i en el cas de les plomes de pollastre tots els fluxos necessaris per engreixar i fer créixer el pollastre, inclosos els productes utilitzats per desplomar el pollastre, són només imputables a la carn de pollastre i no a les PIP. En conseqüència, s'han exclòs de l'estudi tots aquells impactes imputables a la producció de carn de pollastre. Tampoc s'han considerat els possibles beneficis ambientals que pugui tenir el fet de no fer el tractament de les plomes com a residus, tal i com es recomana fer a la PEF.

De totes maneres, en cas que en un futur les plomes de pollastre esdevinguessin un subproducte amb valor de la producció de la carn de pollastre i fos necessari considerar-ne els impactes de la seva producció, al capítol 6.3 s'ha fet una estimació dels impactes ambientals del material compost tenint en compte el creixement i la matança del pollastre.

- L'assecat al laboratori de les plomes i del PLA no ha estat considerat degut a que s'ha fet en estufes de convecció natural. En el cas d'un procés industrial de producció del material, aquest procés d'assecat es faria de forma diferent buscant altres mètodes més eficients com, per exemple, els equips d'assecat industrial a

gran escala. Per tant, s'ha considerat oportú no considerar el consum d'energia de l'estufa i fer una estimació del consum energètic que caldria per eliminar l'aigua de les PIP. Aquest càlcul ha estat realitzat a partir de l'energia teòrica que caldria per evaporar l'aigua tenint en compte la capacitat calorífica de les plomes i del PLA i el seu contingut en aigua

5.2.4. Qualitat de les dades

Les dades utilitzades per aquest ACV provenen de dades experimentals del nostre laboratori (dades de camp) i de la base de dades Ecoinvent 3.0 (dades genèriques). En particular les dades dels consums de matèries primeres i auxiliars de l'estabilització, trituració i fabricació de la placa provenen de mesures fetes directament al nostre laboratori.

Les dades de composició del tensioactiu catiònic provenen del seu fabricant (KAO Corporation) i els impactes ambientals d'aquests components s'han extret de la base de dades Ecoinvent 3.0 (Weidema et al., 2013).

Les aigües residuals generades als processos d'estabilització de les plomes s'han analitzat seguint mètodes estandarditzats amb Standard Methods (Eugene W. Rice, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, 2012). Pel que fa a les dades d'inventari del PLA s'han extret de les dades publicades per Nature Works per la base de dades Ecoinvent 3.0.

La resta de dades (producció d'energia i matèries auxiliars) s'han extret de la base de dades Ecoinvent 3.0 tal i com es pot veure a la Taula 5-2.

Taula 5-2: Fonts de les dades genèriques dels processos

Procés	Font de ecoinvent 3.0
Poly lactide, granulate {GLO} market for Alloc Def, U	Life Cycle Inventories of Renewable Materials. Final report ecoinvent data v2.0 No. 21 (Althaus, H.-J.; Dinkel, F.; Stettler, C.; Werner, 2007)
Electricity, low voltage {ES} market for Alloc Def, U	Life cycle inventories of electricity mixes and grid (Itten, R.; Frischknecht, R.; Stucki, 2012)

Procés	Font de ecoinvent 3.0
Water, deionised, from tap water, at user {GLO} market for Alloc Def, U ¹	Ecoinvent 3.0: (Ecoinvent Cente, 2013)
Benzyl chloride {GLO} market for Alloc Def, U ¹	Ecoinvent 3.0: (Ecoinvent Cente, 2013)
Isopropanol {GLO} market for Alloc Def, U ¹	Ecoinvent 3.0: (Ecoinvent Cente, 2013)
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Alloc Def, U ¹	Ecoinvent 3.0: (Ecoinvent Cente, 2013)
Dimethylamine {GLO} market for Alloc Def, U ¹	Ecoinvent 3.0: (Ecoinvent Cente, 2013)

5.2.5. Metodologia d'impacte a utilitzar i categories d'impacte seleccionades

Degut a la falta de consens científic pel que fa a la metodologia d'impacte i les categories d'impacte a fer una anàlisi de cicle de vida de materials compòsits (Vidal, 2009), per aquest estudi concret s'han seleccionat les següents categories d'impacte del mètode CML-IA (Heijungs et al., 2010):

- Disminució de materials abiòtics (DMA)
- Disminució de materials abiòtics (combustibles fòssils). (DMACF)
- Escalfament global (GWP100a)
- Disminució de la capa d'ozó (ODP)
- Toxicitat humana. (ToxH)
- Ecotoxicitat en aigua dolça. (EtoxAD)
- Ecotoxicitat marina. (EtoxM)
- Ecotoxicitat terrestre. (EtoxTer)
- Oxidació fotoquímica. (OxFQ)
- Acidificació. (Acidif)
- Eutrofització. (Eutrof)

Degut a l'origen biogènic del PLA, s'ha considerat oportú incloure categories d'impacte sobre l'ús del territori que han estat adaptades les categories d'impacte "ocupació de

¹ Component del tensioactiu utilitzat

territori urbà” (OcTerU), “ocupació del territori agrícola” (OcTerA) i “transformació del terreny natural”(OcTerN) del mètode ReCiPe (Goedkoop et al., 2013)

5.3. Inventari de cycle de vida (ICV)

A continuació es presenta l’inventari de cycle de vida del material compost fet amb PLA i plomes de pollastre.

5.3.1. Tractament tèrmic amb autoclau

Aquest tractament, explicat anteriorment a l’apartat 5.2.1.2 i mostrat a la Figura 5-2 consta de dues etapes. La primera etapa consisteix en posar les plomes a l’autoclau amb l’objectiu desinfectar les restes biològiques que acompanyen a les plomes i la segona és un procés d’assecat de les plomes per eliminar-ne la humitat que ha quedat.

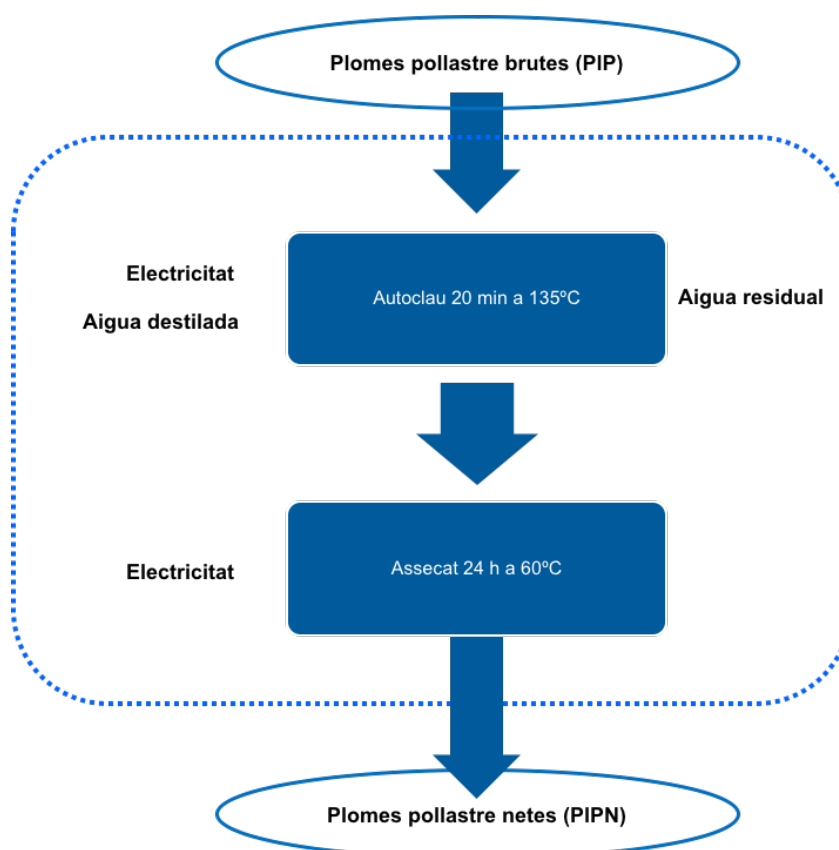


Figura 5-2: Procés tèrmic d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre

Les entrades i sortides d'aquest procés s'han quantificat a la Taula 5-3 per gram de PIP a l'entrada del procés i per g de ploma de pollastre neta i triturada (PIPNT). Les dades s'han expressat en funció dels dos paràmetres per facilitar les comparacions a posteriori:

Taula 5-3: Dades d'inventari del procés tèrmic d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre

Etapa	Material o energia	Quantitat per g de ploma de pollastre (PIP) d'entrada al procés	Unitats	Quantitat per g de ploma neta i triturada (PIPNT)	Unitats	
Entrada del procés	PIP	1	g	2,2	g/g PIPNT	
	Electricitat	1,1	kJ/g PIP	2,4	kJ/g PIPNT	
	Aigua desionitzada	40	g/g PIP	88,9	g/g PIPNT	
Sortida del procés	Aigua residual amb	Demanda Química d'Oxigen (DQO)	12,9	mg/g PIP	28,7	mg/g PIPNT
		Demanda Bioquímica d'Oxigen (DBO ₅)	0,7	mg/g PIP	1,6	mg/g PIPNT
		Sòlids en suspensió	0,06	mg/g PIP	0,1	mg/g PIPNT
		Nitrogen total (NTK)	1	mg/g PIP	2,2	mg/g PIPNT
	PIPNT	0,5	g/g PIP	1,1	g/g PIPNT	

A continuació s'analitzen amb detall els punts clau del procés com són el rendiment del rentat, el consum d'aigua i electricitat de tot el procés i les emissions d'aigües residuals:

- **Rendiment del procés:** A partir de les dades de pes inicial i pes final de plomes dels processos de rentat amb autoclau i assecat posterior fets al laboratori (Taula 5-4) es calcula el rendiment, que en aquest cas és de 0,5 g PIPNT per 1 g de PIP.

Taula 5-4: Dades del rendiment del procés tèrmic d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre

Massa PIP (g)	Massa PIPN (g)	g de PIPN/g PIP
200,1	95,7	0,5
243,2	118,9	0,5
154,65	71,69	0,5
200,13	96,68	0,5

- **Consum d'aigua:** hi ha un consum de 8 l d'aigua per cada cicle de rentat.
- **Consum d'electricitat:**
 - **Autoclau:** els rentats s'han dut a terme a escala de laboratori amb petites quantitats de plomes, però per tenir en compte el consum d'electricitat de l'autoclau s'ha considerat que en un procés industrial es posarien més plomes a cada rentat. Per tant per aquest càlcul s'ha considerat una ocupació del 50% de l'autoclau, que es considera suficient per poder fer correctament el procés d'estabilització. Tenint en compte que la capacitat de l'autoclau és de 30l i la densitat de la ploma de 0,9 g/cm³, l'ocupació de l'autoclau considerada per al consum energètic serà de 13,5 kg de ploma. El consum de l'autoclau a cada cicle de rentat ha estat mesurat al laboratori amb un voltímetre obtenint-se un valor de 2,01 kWh. Si relacionem aquest valor amb els 13,5 kg de ploma que podem tenir a cada rentat, el consum energètic d'aquest procés serà de 0,5 kJ/g de PIP.
 - **Assecat:** com s'ha indicat al capítol 5.2 el consum energètic per assecar les plomes s'ha calculat a partir de l'energia necessària per evaporar l'aigua de les plomes. La Figura 5-3 mostra el diagrama de consum d'energia per eliminar l'aigua de les plomes després del rentat:

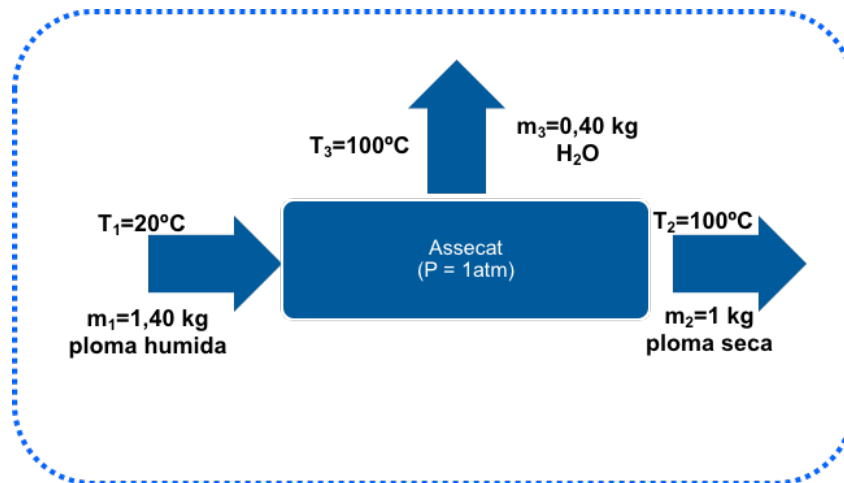


Figura 5-3: Energia consumida per assecar les plomes després del rentat

Els requeriments energètics per assecar les plomes s'han calculat a partir dels balanços d'entalpia descrits a continuació:

$$\frac{dQ}{dt} = m_2 h_2 + m_3 h_3 - m_1 h_1 \quad \text{Equació 5-1}$$

$$h_2 = C_{p \text{ ploma}} (T_2 - T_{\text{ref}}) \quad \text{Equació 5-2}$$

$$h_1 = C_{p \text{ ploma humida}} (T_1 - T_{\text{ref}}) \quad \text{Equació 5-3}$$

$$h_3 = C_{p \text{ H}_2\text{O}} (T_3 - T_{\text{ref}}) + \lambda \quad \text{Equació 5-4}$$

On:

m_1 : massa de ploma humida [kg]

m_2 : massa de ploma seca [kg]

m_3 : massa d'aigua evaporada [kg]

h_1 : entalpia de les plomes humides
[kJ/kg]

h_2 : entalpia de les plomes seques
[kJ/kg]

h_3 : entalpia de l'aigua evaporada [kJ/kg]

$C_{p \text{ ploma}}$: Calor específic de la ploma
seca [kJ/kg·K]

$C_{p \text{ ploma humida}}$: Calor específic de la
ploma humida [kJ/kg·K]

$C_{p \text{ H}_2\text{O}}$: Calor específic de l'aigua
[kJ/kg·K]

λ : Calor latent de l'aigua [kJ/kg]

A la Taula 5-5 es poden veure les dades que s'han utilitzat per calcular l'energia teòrica que caldria per evaporar l'aigua de les plomes de pollastre a la sortida de l'autoclau.

Taula 5-5: Dades per al càlcul de l'energia necessària per assecat les plomes després del procés de rentat

Dada	Valor	Dada	Valor	Dada	Valor
m_1	1,40 kg	$T_1 (T_{ref})$	20 °C	C_p ploma	1,31 kJ/kgK
m_2	1 kg	T_2	100 °C	C_p H ₂ O	4,18 kJ/kgK
m_3	0,40 kg	T_3	100 °C	λ	2257 kJ/kg

La capacitat calorífica (C_p) de les plomes ha estat obtinguda de forma experimental per calorimetria diferencial d'escombratge (DSC), obtenint un valor de C_p de 1,31 kJ/kgK. Aquest valor és el que s'ha agafat de referència per fer els càlculs, degut a que prové d'una font primària i que és similar al valor calculat per altres autors per altres fibres de queratina (Picard et al., 1999; Wortmann et al., 2002). Per altra banda, el seu contingut en aigua també s'ha determinat experimentalment i és del 40% (Macanás et al., 2011).

Aplicant els valors de la Taula 5-5 a les equacions anteriors obtenim un resultat de 1141 kJ/kg de ploma seca, però s'ha tingut en compte que hi pot haver fins a un 10% de pèrdues en el procés i per tant s'ha operat amb un valor de 1255 kJ/kg de ploma seca. Si a aquest valor li apliquem el rendiment del tractament tèrmic (0,5) obtenim un resultat de 0,6 kJ/g ploma bruta.

Per tant el consum total d'electricitat del procés és de 1,1 kJ/ g de ploma bruta, que correspon a la suma del consum degut al funcionament de l'autoclau (0,5 kJ/g) i del procés d'assecat (0,6 kJ/g).

- **Analítiques de les aigües residuals:** el volum de sortida d'aigua del sistema és de 8l per cada cicle de rentat. Les aigües residuals de sortida han estat analitzades al nostre laboratori seguint la metodologia estàndard d'aigües residuals (Eugene W. Rice, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, 2012) amb els resultats següents:

Taula 5-6: Analítiques de les aigües residuals de sortida de l'autoclau

Paràmetre	Norma/Mètode	Resultats
DQO (mgO ₂ /l)	Standard Methods 21th ed 5220	322
DBO ₅ (mgO ₂ /l)	Standard Methods 21th ed 5210	18
pH	Standard Methods 21th ed 4500 H+B	6,11
MES (mg/l)	Standard Methods 21th ed. 2540	1,5
Olis i greixos (mg/l)	Standard Methods 21th ed 5520 B	3
Nitrogen Total (NTK) (mg/l)	Standard Methods 21th ed 4500-N	26
Conductivitat (mS/cm)	Standard Methods 21th ed 2510	125,7

Per avaluar els impactes ambientals deguts a l'aigua residual de sortida del procés s'ha considerat que aquestes aigües s'aboquen directament al medi natural sense cap procés de depuració.

5.3.2. Tractament amb tensioactiu catiònic

El tractament d'estabilització amb tensioactiu catiònic, descrit a l'apartat 5.2.1.3 i que es pot veure esquematitzat a la Figura 5-4, consta de tres etapes diferenciades que són el rentat amb el tensioactiu, l'esbandit de les plomes per eliminar les restes de tensioactiu i un assecat final de les plomes.

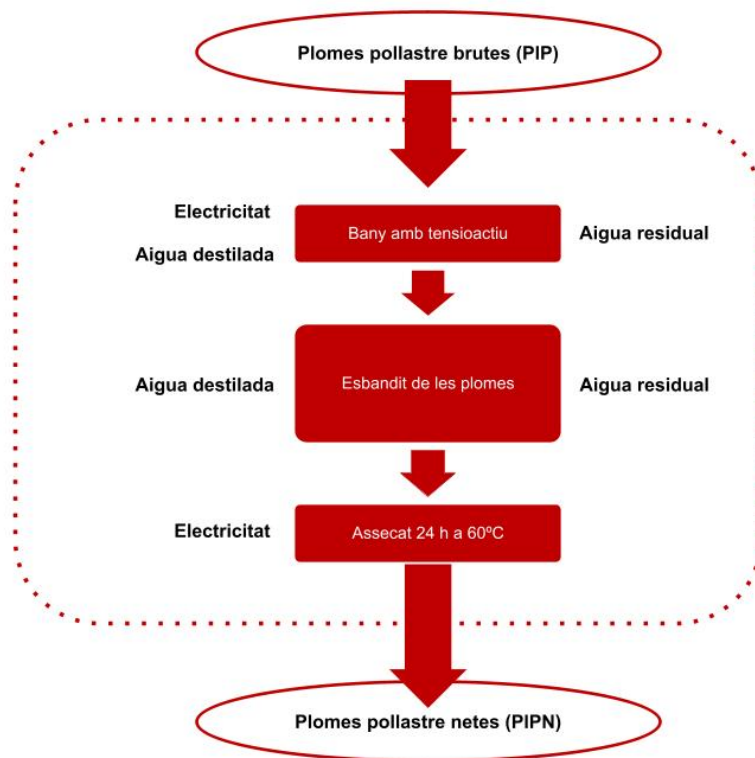


Figura 5-4: Procés d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre amb tensioactiu catònic

En aquest cas les entrades del sistema són les PIP, aigua per rentar i escandir, energia elèctrica per rentar i assecar i el tensioactiu. Les sortides són les PIPN i les aigües residuals del rentat i esbandit:

Taula 5-7: Dades d'inventari del procés d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre amb tensioactiu

Etapa		Material o energia	Quantitat per g de ploma de pollastre (PIP) d'entrada al procés	Unitats	Quantitat per g de ploma neta i triturada (PIPNT)	Unitats	
Entrada del procés	PIP		1	g	2,8	g/g PIPNT	
	Electricitat		12,5	kJ/g PIP	34,7	kJ/g PIPNT	
	Aigua desionitzada		240	g/g PIP	667	g/g PIPNT	
	Tensioactiu	Dimetilamina		0,15	g/g PIP	0,4	g/g PIPNT
		Clorur de benzalconi		0,08	g/g PIP	0,2	g/g PIPNT
		Hidròxid sòdic al 25%		$3,2 \cdot 10^{-04}$	g/g PIP	$9,4 \cdot 10^{-04}$	g/g PIPNT
		Aigua desionitzada		0,04	g/g PIP	0,1	g/g PIPNT
Isopropanol		0,01	g/g PIP	0,03	g/g PIPNT		
Sortida del procés	Aigua residual amb	Demanda Química d'Oxigen (DQO)	781	mg/g PIP	2170	mg/g PIPNT	
		Demanda Bioquímica d'Oxigen (DBO ₅)	50,2	mg/g PIP	139	mg/g PIPNT	
		Sòlids en suspensió	49,7	mg/g PIP	138	mg/g PIPNT	
		Nitrogen total (NTK)	14,4	mg/g PIP	40	mg/g PIPNT	
	Plomes de pollastre netes (PIPNT)		0,4	g/g PIP	1,1	g/g PIPNT	

En el procés d'obtenció d'aquestes dades s'han fet les següents consideracions:

Rendiment del procés: el rendiment del rentat i assecat és de 0,4 grams de ploma neta i seca per cada gram de ploma bruta que es sanititza amb tensioactiu i s'ha calculat a partir de les següents dades dels diferents rentats fets al nostre laboratori (Taula 5-8).

Taula 5-8: Dades del rendiment del procés d'estabilització, rentat i desinfecció amb tensioactiu de les plomes de pollastre

Massa ploma bruta (g)	Massa ploma neta i seca (g)	g de ploma neta i seca/g ploma bruta
2,52	0,95	0,37
2,26	1,01	0,45
2,55	1,04	0,41
2,49	0,89	0,36
2,51	1,06	0,42
2,52	1,20	0,48
2,53	1,15	0,46
2,51	1,03	0,41

- Consum d'electricitat:
 - **Rentat:** el consum d'electricitat per rentar les plomes amb tensioactiu s'ha calculat a partir de la potència de l'equip de rentat (Linitest) (100W) i del temps de funcionament (1h). Fent el cicle de rentat a temperatura ambient i a màxima càrrega de plomes mantenint la relació 1:40 de bany, és a dir 30 g de plomes, el consum elèctric és de 12 kJ per cada gram de ploma bruta.
 - **Assecat:** el consum d'electricitat s'ha calculat de forma anàloga al procés d'assecat de les plomes rentades amb autoclau (equacions 5-1, 5-2, 5-3 i 5-4). Tenint en compte el rendiment del procés, el consum serà de 0,53 kJ/g ploma bruta.
- **Analítiques de les aigües residuals:** el volum de sortida d'aigua del sistema és de 100ml (aigua de rentat) i de 500ml (aigua esbandit) cada 2,5 g de ploma bruta. Les aigües residuals del rentat i de l'esbandit han estat analitzades al nostre laboratori seguint la metodologia estàndard d'aigües residuals (Eugene W. Rice, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, 2012) amb els resultats següents (Taula 5-9):

Taula 5-9: Anàlitzes de les aigües residuals de sortida del tractament amb tensioactiu catiònic

Paràmetre	Norma/Mètode	Resultats rentat	Resultats esbandit
DQO (mgO ₂ /l)	Standard Methods 21th ed 5220	17812	341
DBO5 (mgO ₂ /l)	Standard Methods 21th ed 5210	1129	25
pH	Standard Methods 21th ed 4500 H+B	4,90	6,28
MES (mg/l)	Standard Methods 21th ed. 2540	922	64
Olis i greixos (mg/l)	Standard Methods 21th ed 5520 B	0,33	0,035
Nitrogen Total (NTK) (mg/l)	Standard Methods 21th ed 4500-N	21	68
Conductivitat (mS/cm)	Standard Methods 21th ed 2510	958	38,2

5.3.3. Trituració de les plomes de pollastre

Tal i com ja s'ha descrit a l'apartat 5.2.1.4 i com es pot veure a la Figura 5-5: Procés de trituració de les plomes de pollastre. la trituració de les plomes consisteix en un procés mecànic de trituració en un molí de fulles i en un assecat posterior per eliminar qualsevol excés d'humitat de les plomes.

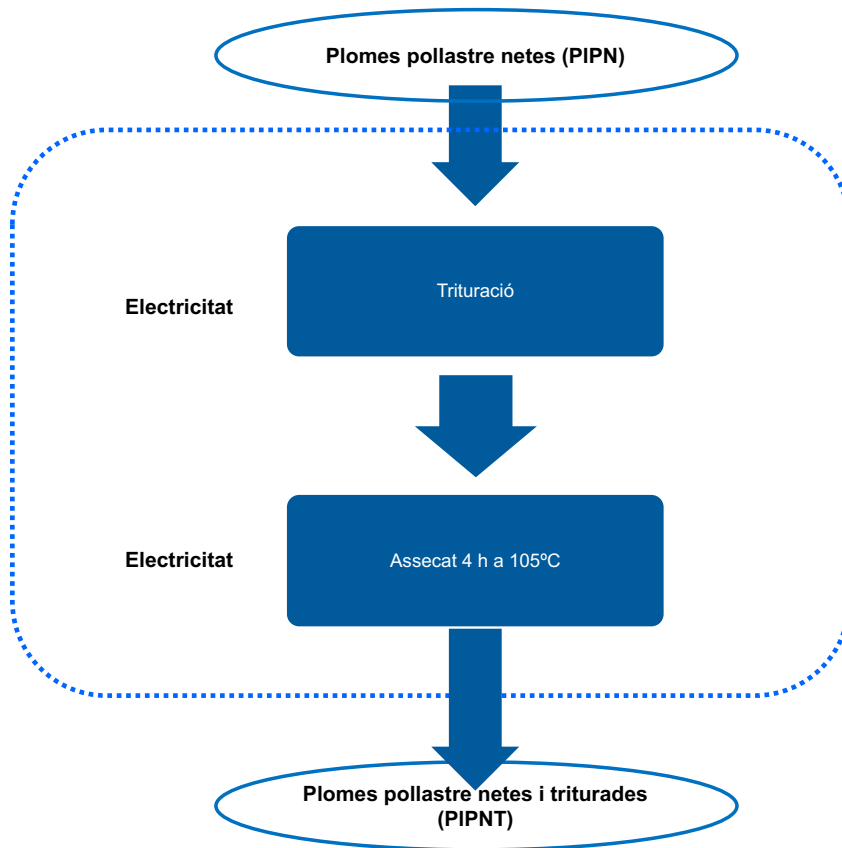


Figura 5-5: Procés de trituració de les plomes de pollastre.

Les dades d’inventari corresponents al procés de trituració de les plomes s’indiquen a la següent taula:

Taula 5-10: Dades d’inventari del procés de trituració de la ploma

Etapa	Material o energia	Quantitat per g de ploma de pollastre (PIP) d’entrada al procés	Unitats	Quantitat per g de ploma neta i triturada (PIPNT)	Unitats
Entrada del procés	Plomes de pollastre netes (PIPNT)	1.0	g	1.1	g/g PIPNT
Inputs	Electricitat	14.1	kJ/g PIP	15.7	kJ/g PIPNT
Sortida del procés	Plomes de pollastre netes i triturades (PIPNT)	0.9	g/g PIP	1.0	g/g PIPNT

Per obtenir aquestes dades s'han fet les següents consideracions:

- **Rendiment de la trituració:** el rendiment de la trituració té un valor de 0,9 i correspon a la suma del rendiment de la trituració i del posterior assecat de la ploma triturada. Aquests rendiment s'ha calculat a partir de les dades experimentals que podem veure a la Taula 5-11.

Taula 5-11: Dades de rendiment de la trituració de les plomes

Massa ploma neta abans de la trituració (g)	Massa ploma neta i triturada i seca (g)	g de ploma triturada / g ploma neta i seca
53,45	46,00	0,86
53,55	49,12	0,92
55,43	49,96	0,90
58,28	52,14	0,89
70,30	65,85	0,94
80,02	76,05	0,95
90,01	89,03	0,99
91,70	89,34	0,97
113,63	110,85	0,98
150,02	143,04	0,95
195,00	188,05	0,97
202,23	195,81	0,97
220,05	214,01	0,97
254,08	241,38	0,95
258,02	246,21	0,96
270,04	259,00	0,95
296,37	281,93	0,97
328,04	318,00	0,95
344,28	325,80	0,94
377,03	355,02	0,94
622,84	588,02	0,94

- **Consum d'electricitat:** el consum d'electricitat és la suma dels consums del procés de trituració (13,68 kJ/g PIP) i del procés d'assecat (0,46 kJ/g PIP). El consum del procés de trituració s'ha calculat a partir de la potència de l'equip (2200 W) i del temps de trituració. L'energia del assecat, s'ha calculat utilitzant les equacions 5-1, 5-2, 5-3 i 5-4.

5.3.4. Fabricació de la placa de material compòsit

Per la fabricació de la placa de material compòsit segons s'ha descrit a l'apartat 5.2.1.5 i es mostra gràficament a la Figura 5-6 és necessària la mescla del PLA i PIP secs en una mescladora i un procés posterior de premsat en una premsadora per obtenir la placa de material compòsit.

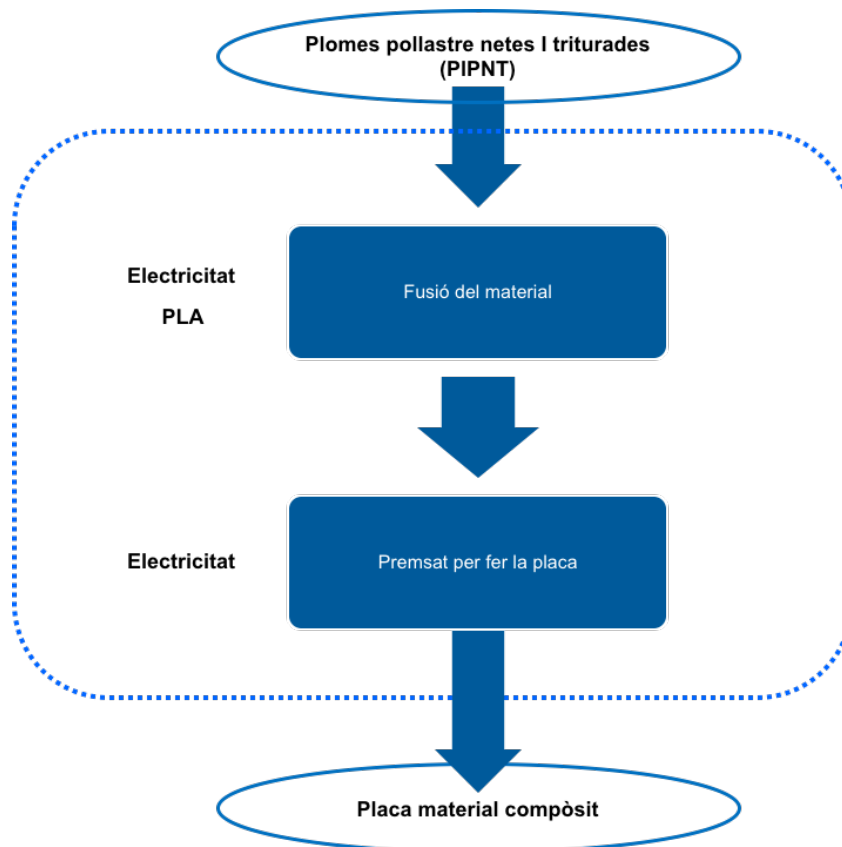


Figura 5-6: Procés de fabricació de la placa de material compòsit.

Les dades d'inventari per aquest procés depenen del percentatge de PLA que hi hagi a cada placa, i es detallen a la següent taula:

Taula 5-12: Dades d'inventari de la fabricació de la placa

Placa de matèria compòsit	Etapa del procés	Material o energia	Quantitat	Unitats
Placa 100% PLA	Entrada del procés	Plomes de pollastre netes i triturades (PIPNT)	0	g/UF
		PLA	102,4	g/UF
		Electricitat	761,5	kJ/UF
	Sortida del procés	Placa material	1	UF
Placa 90% PLA i 10% PIPNT	Entrada del procés	Plomes de pollastre netes i triturades (PIPNT)	7,9	g/UF
		PLA	92,2	g/UF
		Electricitat	759,9	kJ/UF
	Sortida del procés	Placa material	1	UF
Placa 80% PLA i 20% PIPNT	Entrada del procés	Plomes de pollastre netes i triturades (PIPNT)	15,7	g/UF
		PLA	81,9	g/UF
		Electricitat	758,2	kJ/UF
	Sortida del procés	Placa material	1	UF
Placa 75% PLA i 25% PIPNT	Entrada del procés	Plomes de pollastre netes i triturades (PIPNT)	19,7	g/UF
		PLA	76,8	g/UF
		Electricitat	757,4	kJ/UF
	Sortida del procés	Placa material	1	UF

Per obtenir aquestes dades s'han fet les següents consideracions:

- Els percentatges de cada material estan calculats en volum per cada una de les plaques. S'ha considerat una densitat de 0.9 g/cm³ per les plomes i de 1.25 g/cm³ pel PLA (Cañavate et al., 2015; Casadesús et al., 2018).
- **Consum d'electricitat:** el consum d'electricitat és diferent per cada placa, degut a que és la suma del consum d'electricitat per eliminar les traces d'humitat del PLA, el consum de la mescladora i el de la premsa.

- L'energia necessària per assecat el PLA s'ha calculat de la mateixa manera que en el cas d'assecat de les plomes (equacions 5-1, 5-2, 5-3 i 5-4).
 - El consum de la mescladora s'ha calculat a partir de mesures experimentals fetes al laboratori obtenint un valor de 4,06 kJ/cm³ de material compòsit sense apreciar-se variacions en el consum degudes a les diferents proporcions entre plomes i PLA veure annex F.
 - El consum de la premsa també s'ha calculat a partir de mesures experimentals fetes al laboratori amb un valor final mitjà de 5,95 kJ/cm³ de material compòsit per totes les plaques veure annex G.
- **Rendiment de la fabricació:** s'ha considerat un 10% de pèrdues en el procés de fabricació de la placa.

5.4. Bibliografia

- Althaus, H.-J; Dinkel, F; Stettler, C; Werner, F. (2007). *Life Cycle Inventories of Renewable Materials. Final report ecoinvent data v2.0 No. 21* (S. C. for L. C. I. EMPA, Ed.). www.ecoinvent.org
- Baillie, C. (2004). *Green Composites, Polymer composites and the environment*. Woodhead Publishing Ltd.
- Barone, J. (2009). Lignocellulosic Fiber-Reinforced Keratin Polymer Composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 17(2), 143–151.
- Barone, J. R., & Schmidt, W. F. (2006). *Compositions and films comprised of avian feather keratin*. Google Patents. <http://www.google.co.in/patents/EP1732987A2?cl=en>
- Bengtsson, J., & Seddon, J. (2013). Cradle to retailer or quick service restaurant gate life cycle assessment of chicken products in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 41, 291–300.
- Cañavate, J., Aymerich, J., Garrido, N., Colom, X., Macanás, J., Molins, G., Álvarez, M. D., & Carrillo, F. (2015). Properties and optimal manufacturing conditions of chicken feathers/poly(lactic acid) biocomposites. *Journal of Composite Materials*, 50(12).
<https://doi.org/10.1177/0021998315595534>
- Casadesús, M., Macanás, J., Colom, X., Cañavate, J., Álvarez, M. D., Garrido, N., Molins, G., & Carrillo, F. (2018). Effect of chemical treatments and additives on properties of chicken feathers thermoplastic biocomposites. *Journal of Composite Materials*.
<https://doi.org/10.1177/0021998318766652>

- Cesari, V. (2017). Environmental impact assessment of an Italian vertically integrated broiler system through a Life Cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 143, 904. <http://mendeley.csuc.cat/fitxers/c000f33ecc5a4be00839b37fd0d3caa2>
- Cooper, J. (2003). Specifying functional units and reference flows for comparable alternatives. *INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT*, 8(6), 337.
- Corbiere-Nicollier, T., Gfeller-Laban, B., Lundquist, L., Leterrier, Y., Manson, J., & Jolliet, O. (2001). Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics. *Resources, Conservation, and Recycling*, 33(4), 267–287.
- Ecoinvent Cente. (2013). *Ecoinvent Database 3.0*.
- Eugene W. Rice, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, L. S. C. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *American Water Works Association/American Public Works Association/Water Environment Federation*, 1, 1469.
- European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance* (EUR 24708 EN, Ed.; First, Vol. 1). Publications Office of the European Commission. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Garrido, N., Aymerich, J., Colom, X., Cañavate, X., Macanás, J., Álvarez, M. D., Molins, G., & Carrillo, F. (2011). Optimal manufacturing conditions of chicken feathers/PLA biocomposites. *12th Mediterranean Congress of Chemical Engineering*.
- Gassner, G. (2000). *Conversion of avian feathers-waste stream to useful products: Vol. 09/266,820*.
- Gassner, G., Schimdt, W., Line, M., Thomas, C., & Walters, R. (1998). *Fiber and fiber products produced from feathers: Vol. 471,349*.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M. A. J., Schryver, A. De, Struijs, J., & Zelm, R. van. (2013). *ReCiPe 200 8 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*.
- González-García, S., Gomez-Fernández, Z., Dias, A. C., Feijoo, G., Moreira, M. T., & Arroja, L. (2014). Life Cycle Assessment of broiler chicken production: a Portuguese case study. *Journal of Cleaner Production*, 74, 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.067>
- Heijungs, R., Hupperts, G., & Guinee, J. (2010). Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis. In *Polymer degradation and stability* (Vol. 95, Issue 3, pp. 422–428). Elsevier.
- Itten, R.; Frischknecht, R.; Stucki, M. (2012). *Life Cycle inventories of electricity mixes and grid*. www.lc-inventories.ch

- Joshi, S., Drzal, L., Mohanty, A., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? In *Composites. Part A, Applied science and manufacturing* (Vol. 35, Issue 3, pp. 371–376). Elsevier.
- Kalhor, T. (2016). Environmental impact assessment of chicken meat production using life cycle assessment. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 262.
<http://mendeley.csuc.cat/fitxers/52c991ec57d2ec05bf21824dba1ad6a6>
- Macanás, J., Molins, G., Álvarez, M. D., Colom, X., Cañavate, J., Garrido, N., & Carrillo, F. (2011). Physicochemical characterization of a valorisable waste: chicken feathers. *12th Mediterranean Congres*, 21–25.
- Mahalle, L. (2014). A cradle-to-gate life cycle assessment of wood fibre-reinforced polylactic acid (PLA) and polylactic acid/thermoplastic starch (PLA/TPS) biocomposites. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(6), 1305.
<http://mendeley.csuc.cat/fitxers/6ba9e03cd133a44dbcf9c439f327ba9d>
- Ministerio de Agricultura, P. y A. (2007). *Libro blanco subproductos de origen animal no destinados al consumo humano*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Mohammed, A. A. B. A., Borhana Omran, A. A., Hasan, Z., Ilyas, R. A., & Sapuan, S. M. (2021). Wheat biocomposite extraction, structure, properties and characterization: A review. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 21). <https://doi.org/10.3390/polym13213624>
- Picard, K., Thomas, D. W., Festa-Bianchet, M., Belleville, F., & Laneville, A. (1999). Differences in the thermal conductance of tropical and temperate bovid horns. *Ecoscience*.
<https://doi.org/10.1080/11956860.1999.11682515>
- Plackett, D., Andersen, T. L., Pedersen, W. B., & Nielsen, L. (2003). Biodegradable composites based on L-poly lactide and jute fibres. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1287–1296.
- Prudêncio da Silva, V., van der Werf, H. M. G., Soares, S. R., & Corson, M. S. (2014). Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: An LCA approach. *Journal of Environmental Management*, 133, 222–231.
- Shanmugam, V., Mensah, R. A., Försth, M., Sas, G., Restás, Á., Addy, C., Xu, Q., Jiang, L., Neisiany, R. E., Singha, S., George, G., Jose E, T., Berto, F., Hedenqvist, M. S., Das, O., & Ramakrishna, S. (2021). Circular economy in biocomposite development: State-of-the-art, challenges and emerging trends. In *Composites Part C: Open Access* (Vol. 5). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100138>
- Skunca, D. (2018). Life cycle assessment of the chicken meat chain. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 184, 440. <http://mendeley.csuc.cat/fitxers/ac38738dcfff74c8ce209aedd3a613e3>
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D., & Ndlela, L. (2018). Optimisation of surfactant decontamination and pre-treatment of waste chicken feathers by using response surface methodology. *Waste Management (New York, N.Y.)*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.013>

- Vidal, R. (2009). Life cycle assessment of composite materials made of recycled thermoplastics combined with rice husks and cotton linters. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(1), 73–82.
- Wang, Q., Ji, C., Sun, L., Sun, J., & Liu, J. (2020). Cellulose nanofibrils filled poly(lactic acid) biocomposite filament for FDM 3D printing. *Molecules*, 25(10).
<https://doi.org/10.3390/molecules25102319>
- Weidema, B. P., Bauer, C., Hischer, R., Mutel, C. L., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C. O., & Wernet, G. (2013). Data quality guidelines for the ecoinvent database version 3: Overview and methodology (final). In *The International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 10, Issue 1).
- Wool, R., & Hong, C. (2005). Development of a bio-based composite material from soybean oil and keratin fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 95(6), 1524.
<http://www3.interscience.wiley.com/journal/109876070/abstract>
- Wortmann, F.-J., Springob, C., & Sendelbach, G. (2002). Investigations of cosmetically treated human hair by differential scanning calorimetry in water. *Journal of Cosmetic Science*.
- Wotzel, K., Wirth, R., & Flake, M. (1999). Life cycle studies on hemp fibre reinforced components and ABS for automotive parts. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 272, 121–127.
- Wrzesniewska-Tosik, K., Wawro, D., Ratajska, M., & Steplewski, W. (2007). Novel biocomposites with feather keratin. In *Fibres Textiles in Eastern Europe* (Vol. 15, Issues 5–6, p. 157).
- Xu, X., Jayaraman, K., Morin, C., & Pecqueux, N. (2008). Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1–3), 168–177.
- Zamperi, L., & Pant, R. (2019). Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. In *Publications Office of the European Union*.

6. Anàlisi d'impacte i interpretació dels resultats

6.1. Avaluació de l'impacte ambiental

Una vegada definides i quantificades les entrades i sortides del sistema estudiat (ICV), cal fer l'avaluació del seu impacte. Tal i com s'ha dit a l'apartat 5.2.5 es farà l'avaluació de l'impacte del material per les categories incloses al mètode d'impacte CML-IA (Heijungs et al., 2010) i també per la categoria d'“ocupació de territori urbà i agrícola i transformació del terreny natural” del mètode ReCiPe (Goedkoop et al., 2013). Aquestes categories s'han descrit a l'apartat 4.3 d'aquesta tesi.

En aquesta part de l'ACV totes les entrades i sortides del sistema identificades i quantificades a l'ICV són traslladades a resultats d'impacte per cada indicador de cada categoria. En aquesta tesi, s'han considerat les etapes de classificació i caracterització. Pel que fa a la classificació, totes les dades d'inventari han estat assignades a les categories d'impacte en funció de la seva contribució als diferents problemes ambientals. A la caracterització, els fluxos s'han modelitzat per quantificar la seva contribució a les diferents categories d'impacte i els resultats s'han agrupat per categoria d'impacte.

La modelització s'ha fet amb l'ajuda del programa SimaPro (PRé Consultants, 2014). A continuació es presenten els resultats obtinguts als dos processos d'estabilització de les PIP estudiats. Posteriorment s'ha procedit a calcular l'impacte ambiental de la fabricació

d'una placa del material amb les característiques descrites a la unitat funcional amb el procés d'estabilització menys impactant. Es seleccionarà el procés amb menys impacte ambiental degut a que els estudis realitzats sobre les propietats mecàniques del material revelen que aquestes no es veuen afectades pels diferents processos d'estabilització de les plomes en el rang de composició de plomes estudiat (Carrillo, Rahhali, Canavate, & Colom, 2013).

6.1.1. Resultat de l'avaluació d'impacte del procés d'estabilització de les plomes

6.1.1.1. Caracterització de 1kg de PIPN amb autoclau

Per fer la caracterització dels impactes ambientals potencials que es generen per obtenir 1kg de plomes netes a punt de ser triturades utilitzant l'autoclau s'han utilitzat les dades d'inventari de la Taula 5-3.

A continuació (Taula 6-1) es mostren els resultats obtinguts per a cada categoria d'impacte. Aquest impacte també es presenta desglossat per veure quina és la contribució a l'impacte total del consum de l'electricitat, del consum d'aigua i de la resta d'aspectes del procés que no són consum d'aigua o electricitat.

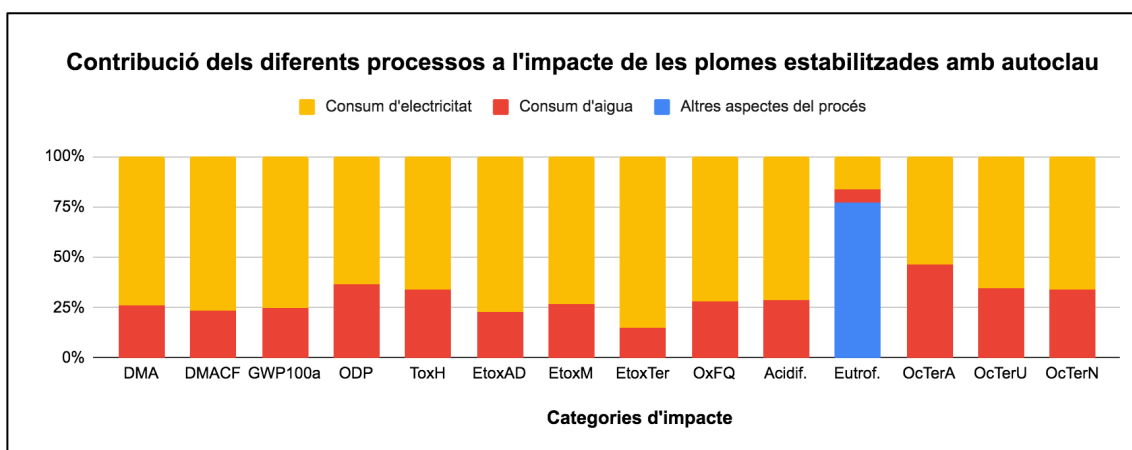
Tal i com s'ha explicat a l'apartat 5.2.3 les plomes de pollastres entren al sistema sense càrrega ambiental.

Taula 6-1: Dades de caracterització de 1 kg de PIPN amb autoclau utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Categoria d'impacte (Unitats)	Impacte total	Consum aigua	Consum electricitat	Altres entrades i sortides del procés
DMA (kg Sb eq/kg PIPN)	$3,57 \cdot 10^{-8}$	$9,23 \cdot 10^{-9}$	$2,65 \cdot 10^{-8}$	0
DMACF (MJ/kg PIPN)	$6,03 \cdot 10^0$	$1,43 \cdot 10^0$	$4,60 \cdot 10^0$	0
GWP100a (kg CO ₂ eq/kg PIPN)	$4,10 \cdot 10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^{-1}$	$3,00 \cdot 10^{-1}$	0
ODP (kg CFC-11 eq/kg PIPN)	$6,41 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-8}$	$4,05 \cdot 10^{-8}$	0
ToxH (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$3,84 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	0
EtoxAD (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$4,94 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$3,82 \cdot 10^{-3}$	0

Categoria d'impacte (Unitats)	Impacte total	Consum aigua	Consum electricitat	Altres entrades i sortides del procés
EtoxM (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$2,74 \cdot 10^{+2}$	$7,37 \cdot 10^{+1}$	$2,00 \cdot 10^{+2}$	0
EtoxTer (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$3,18 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$	0
OxFQ (kg C ₂ H ₄ eq/kg PIPN)	$9,70 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$6,98 \cdot 10^{-5}$	0
Acidif. (kg SO ₂ eq/kg PIPN)	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$6,90 \cdot 10^{-4}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	0
Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/kg PIPN)	$7,58 \cdot 10^{-4}$	$4,97 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$5,86 \cdot 10^{-04}$
OcTerA (m ² a/kg PIPN)	$5,26 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$2,82 \cdot 10^{-3}$	0
OcTerU (m ² a/kg PIPN)	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-4}$	$9,59 \cdot 10^{-4}$	0
OcTerN (m ² /kg PIPN)	$9,29 \cdot 10^{-6}$	$3,16 \cdot 10^{-6}$	$6,13 \cdot 10^{-6}$	0

Si es fa una representació gràfica d'aquestes dades (Gràfica 6-1) s'observa clarament que la major part dels impactes provenen del consum d'electricitat del procés que supera el 50% de l'impacte en totes les categories, excepte en eutrofització on la major part de l'impacte és deguda a l'abocament d'aigües residuals al medi. L'electricitat consumida correspon al consum elèctric de l'autoclau i al consum elèctric d'assecar les plomes (calculat a partir de les equacions 5-1, 5-2, 5-3 i 5-4) tal i com s'ha explicat anteriorment a l'apartat 5.3.1.



Gràfica 6-1: Anàlisi de l'impacte de 1kg de PIPN estabilitzades amb autoclau utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

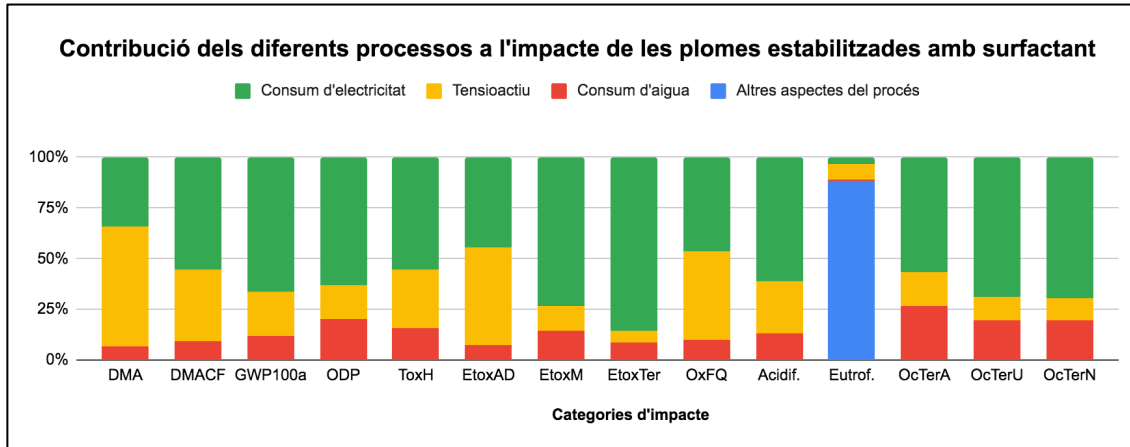
6.1.1.2. Caracterització de 1kg de PIPN amb tensioactiu

En el cas de les PIPN estabilitzades amb tensioactiu, a partir de les dades d'inventari de la Taula 5-7 s'obtenen els següents resultats:

Taula 6-2: Dades de caracterització de 1 kg de PIPN amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Categoria d'impacte (Unitats)	Total	Consum aigua	Tensioactiu	Consum electricitat	Altres entrades i sortides del procés
DMA (kg Sb eq/kg PIPN)	$9,65 \cdot 10^{-7}$	$6,33 \cdot 10^{-8}$	$5,70 \cdot 10^{-7}$	$3,32 \cdot 10^{-7}$	0
DMACF (MJ/kg PIPN)	$1,03 \cdot 10^{+2}$	$98,1 \cdot 10^{-1}$	$3,61 \cdot 10^{+1}$	$5,75 \cdot 10^{+1}$	0
GWP100a (kg CO ₂ eq/kg PIPN)	$58,6 \cdot 10^{-1}$	$6,90 \cdot 10^{-1}$	$12,9 \cdot 10^{-1}$	$38,7 \cdot 10^{-1}$	0
ODP (kg CFC-11 eq/kg PIPN)	$8,06 \cdot 10^{-7}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$	$1,38 \cdot 10^{-7}$	$5,06 \cdot 10^{-7}$	0
ToxH (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$5,72 \cdot 10^{-1}$	$8,89 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	0
EtoxAD (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$5,18 \cdot 10^{-2}$	$4,78 \cdot 10^{-2}$	0
EtoxM (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$3,42 \cdot 10^{+3}$	$5,05 \cdot 10^{+2}$	$4,10 \cdot 10^{+2}$	$2,51 \cdot 10^{+3}$	0
EtoxTer (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$2,59 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$	0
OxFQ (kg C ₂ H ₄ eq/kg PIPN)	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	$8,18 \cdot 10^{-4}$	$8,72 \cdot 10^{-4}$	0
Acidif. (kg SO ₂ eq/kg PIPN)	$3,53 \cdot 10^{-2}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$8,95 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	0
Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/kg PIPN)	$4,59 \cdot 10^{-2}$	$3,41 \cdot 10^{-4}$	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$4,06 \cdot 10^{-2}$
OcTerA (m ² a/kg PIPN)	$6,21 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	0
OcTerU (m ² a/kg PIPN)	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	0
OcTerN (m ² /kg PIPN)	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$7,67 \cdot 10^{-5}$	0

En aquest cas també es constata que el consum d'electricitat és l'impacte més elevat en la majoria de categories d'impacte, però no es pot menysprear la influència del tensioactiu en l'impacte global del procés, que en algunes categories com esgotament de recursos no renovables (DMA), ecotoxicitat de les aigües continentals (EtoxAD) o formació de fotooxidants (OxFQ) té valors als voltant del 50% de l'impacte (Gràfica 6-2).



Gràfica 6-2: Anàlisi de l'impacte de 1kg de PIPN estabilitzades amb autoclau utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

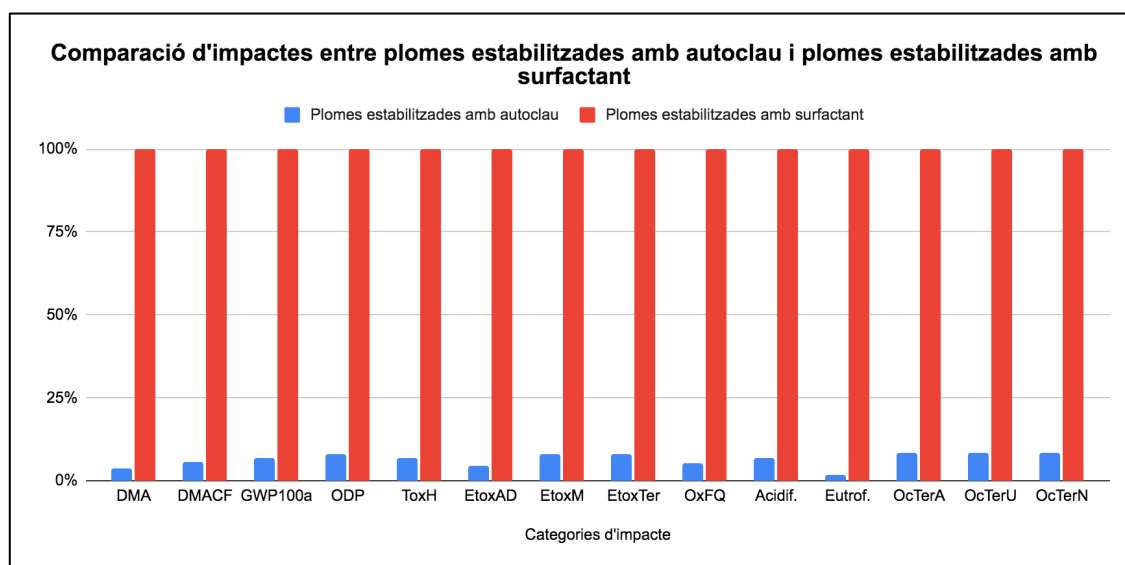
Si es comparen els resultats dels dos mètodes d'estabilització estudiats (Taula 6-3) es constata que els valors d'impacte de l'estabilització amb tensioactiu són molt més elevats que en cas de l'autoclau per totes les categories considerades:

Taula 6-3: Comparació de les dades de caracterització de 1 kg de PIPN amb autoclau i amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Categoria d'impacte (Unitats)	PIPn (autoclau)	PIPn (tensioactiu)
DMA (kg Sb eq/kg PIPN)	$3,57 \cdot 10^{-8}$	$9,65 \cdot 10^{-7}$
DMACF (MJ/kg PIPN)	$60,3 \cdot 10^{-1}$	$1,03 \cdot 10^{+2}$
GWP100a (kg CO ₂ eq/kg PIPN)	$4,10 \cdot 10^{-1}$	$58,6 \cdot 10^{-1}$
ODP (kg CFC-11 eq/kg PIPN)	$6,41 \cdot 10^{-8}$	$8,06 \cdot 10^{-7}$
ToxH (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$3,84 \cdot 10^{-2}$	$5,72 \cdot 10^{-1}$
EtoxAD (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$4,94 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$
EtoxM (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$2,74 \cdot 10^{+2}$	$3,42 \cdot 10^{+3}$
EtoxTer (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$2,59 \cdot 10^{-3}$
OxFQ (kg C ₂ H ₄ eq/kg PIPN)	$9,70 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$
Acidif. (kg SO ₂ eq/kg PIPN)	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-2}$
Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/kg PIPN)	$7,58 \cdot 10^{-4}$	$4,59 \cdot 10^{-2}$
OcTerA (m ² a/kg PIPN)	$5,26 \cdot 10^{-3}$	$6,21 \cdot 10^{-2}$

Categoria d'impacte (Unitats)	PIPN (autoclau)	PIPN (tensioactiu)
OcTerU (m ² a/kg PIPN)	1,47·10 ⁻³	1,75·10 ⁻²
OcTerN (m ² /kg PIPN)	9,29·10 ⁻⁶	1,10·10 ⁻⁴

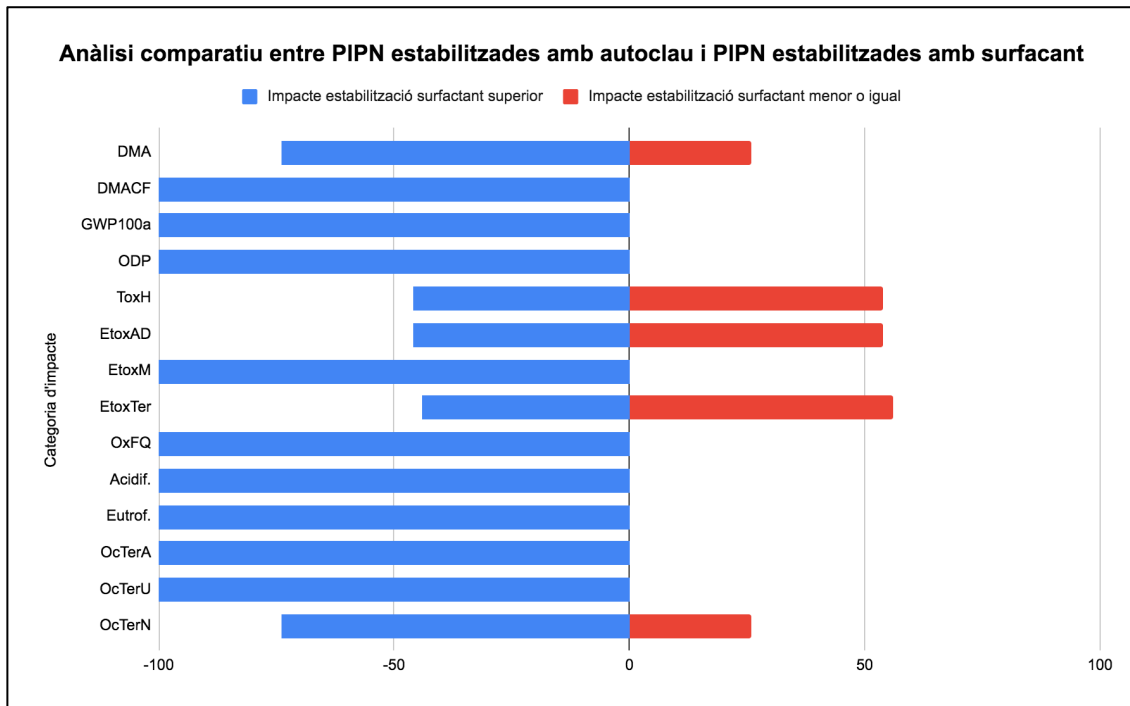
Aquesta diferència es pot veure més clarament fent una representació gràfica d'aquestes dades a la Gràfica 6-3 donant el valor de 100 al valor més elevat de cada categoria d'impacte i calculant l'altre en funció d'aquest valor. D'aquesta manera es pot observar més fàcilment que l'impacte de l'estabilització amb tensioactiu és més gran que amb autoclau en totes les categories d'impacte estudiades:



Gràfica 6-3: Comparació dels impactes de 1kg de PIPN estabilitzades amb autoclau i amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat exclouent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Tot i constatar aquesta gran diferència en els valors mitjans d'impacte, cal considerar que la tècnica del ACV porta associades incerteses en els seus valors. Per aquest motiu s'ha procedit a fer una comparació de la distribució de les incerteses mitjançant simulació Monte Carlo per valorar si aquests valors són significativament diferents. La simulació s'ha fet amb 5000 iteracions i els resultats permeten establir un valor de coeficient de variació amb el 95% de confiança per totes les categories d'impacte considerades. Els resultats de l'anàlisi mostrats a la Gràfica 6-4 permeten comprovar que per la majoria de les categories, l'estabilització de plomes amb autoclau té un impacte menor en tots els

casos (es veu un valor de -100 a la gràfica). Hi ha cinc categories on aquesta tendència no es veu tan clara i que cal analitzar amb més detall. A la Taula 6-4 es presenten els valors de l'anàlisi de sensibilitat i els coeficients de variació per a totes les categories d'impacte i es pot comprovar que aquestes 5 categories són les que tenen una major incertesa associada als seus valors i per tant és esperable que no es pugui definir un menor impacte per les plomes estabilitzades amb autoclau de manera significativa tot i que el valor mitjà de l'impacte sigui menor.



Gràfica 6-4: Anàlisi d'incertesa de 1 kg 'Plomes estabilitzades amb autoclau' (A) menys 1 kg 'Plomes estabilitzades amb tensioactiu' (B). Mètode: CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25, interval de confiança: 95 % i 50 runs.

Taula 6-4: Anàlisi de sensibilitat dels impactes ambientals: valors esperats i coeficient de variació (CV) per 1 kg de PIPN amb autoclau i amb tensioactiu utilitzant el mètode CML-IA EU25 i 5000 runs

Categories d'impacte (Unitats)	Estabilització amb autoclau		Estabilització amb tensioactiu	
	Mitjana dels valors simulats (95%)	CV (%)	Mitjana dels valors simulats (95%)	CV (%)
EtoxTerr (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$2,53 \cdot 10^{-1}$	30240	$-1,01 \cdot 10^{-1}$	-3670
EtoxAD (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$4,69 \cdot 10^{-1}$	791	$5,65 \cdot 10^{-1}$	1214

Categories d'impacte (Unitats)	Estabilització amb autoclau		Estabilització amb tensioactiu	
	Mitjana dels valors simulats (95%)	CV (%)	Mitjana dels valors simulats (95%)	CV (%)
ToxH (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$3,90 \cdot 10^{-1}$	517	$8,76 \cdot 10^{-1}$	653
DMA (kg Sb eq/kg PIPN)	$2,33 \cdot 10^{-7}$	675	$9,38 \cdot 10^{-7}$	357
OcTerN (m ² /kg PIPN)	$1,06 \cdot 10^{-5}$	113	$1,08 \cdot 10^{-4}$	110
OcTerU (m ² a) /kg PIPN	$8,11 \cdot 10^{-4}$	55	$1,75 \cdot 10^{-2}$	55
EtoxM (kg 1,4-DB eq/kg PIPN)	$1,30 \cdot 10^{+2}$	33	$4,82 \cdot 10^{+3}$	33
ODP (kg CFC-11 eq/kg PIPN)	$1,41 \cdot 10^{-8}$	22	$8,06 \cdot 10^{-7}$	19
OcTerU (m ² a/kg PIPN)	$8,39 \cdot 10^{-4}$	16	$6,20 \cdot 10^{-2}$	15
DMACF (MJ/kg PIPN)	$8,65 \cdot 10^{-1}$	14	$1,04 \cdot 10^{+2}$	12
Acidif. (kg SO ₂ eq/kg PIPN)	$2,84 \cdot 10^{-4}$	12	$3,53 \cdot 10^{-2}$	12
OxFQ (kg C ₂ H ₄ eq/kg PIPN)	$1,15 \cdot 10^{-5}$	12	$1,88 \cdot 10^{-3}$	11
GWP100a (kg CO ₂ eq/kg PIPN)	$3,92 \cdot 10^{-2}$	10	$5,87 \cdot 10^0$	8
Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/kg PIPN)	$1,75 \cdot 10^{-4}$	17	$4,90 \cdot 10^{-2}$	5

Si es mira amb detall l'origen de les diferències en l'impacte ambiental d'aquests 2 mètodes és dedueix que aquestes diferències són causades majoritàriament pel consum elèctric dels dos mètodes. Aquest consum és el que té una contribució més elevada en l'impacte final en tots dos casos (Gràfica 6-1 i Gràfica 6-2), però el seu valor és més de 10 vegades superior en el procés amb tensioactiu (1,1 kJ/g de PIP per l'autoclau i 12,5 kJ/g de PIP pel tensioactiu). Tampoc es poden menystenir les diferències en el consum d'aigua (40g/g de PIP en l'autoclau i 240g/g de PIP en el tensioactiu), que tot i tenir una menor contribució a l'impacte final dels processos, també és molt més petita en el cas de l'autoclau.

Pel que fa a la càrrega contaminant de les aigües residuals, també s'observa que les aigües sortints del procés amb autoclau tenen una càrrega contaminat menor (veure Taula 5-3 i Taula 5-7). Aquestes diferències en el consum d'aigua i en la càrrega contaminant de les aigües residuals són degudes al procés, ja que per estabilitzar les plomes amb tensioactiu cal fer un bany d'aigua amb una ratio suficient per cobrir les PIP, circumstàncies que no

es donen en el cas de l'autoclau, on no es submergeixen les plomes, sinó que són sotmeses a un tractament amb vapor.

A partir d'aquests resultats, que evidencien el menor impacte de l'estabilització de les plomes amb autoclau, es valorarà l'impacte ambiental associat al procés de trituració de les plomes i al de la fabricació de la placa tenint en compte només aquest procés d'estabilització, ja que té un impacte ambiental menor i les propietats mecàniques del material processat a partir d'aquest tractament no difereixen de les de les plaques fabricades a partir del tractament amb tensioactiu (Carrillo, Rahhali, Canavate, & Colom, 2013).

6.1.2. Resultat d'avaluació de l'impacte del procés de trituració i posterior assecat de les plomes de pollastre

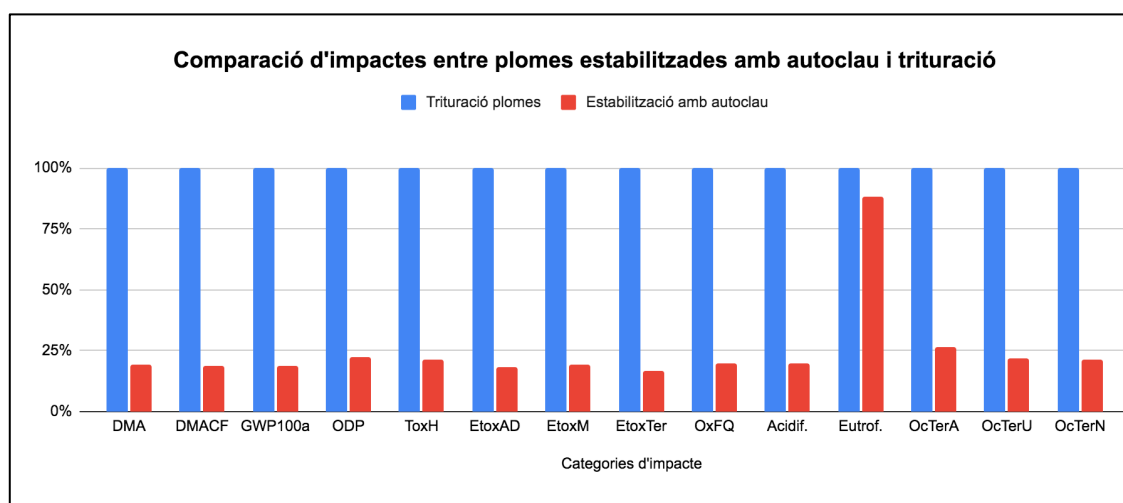
La caracterització dels impactes de la trituració de plomes a partir de les dades d'inventari mostrades a la Taula 5-10 i que inclou únicament l'impacte de l'electricitat en la trituració i assecat de les plomes té els següents valors (per valorar l'impacte d'aquest procés, no s'ha tingut en compte l'impacte d'estabilitzar les plomes):

Taula 6-5: Dades de caracterització de l'obtenció de 1 kg de PIPNT a partir de plomes estabilitzades (PIPNT) utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Categoria d'impacte (Unitats)	PIPNT
DMA (kg Sb eq/kg PIPNT)	$1,86 \cdot 10^{-7}$
DMACF (MJ/kg PIPNT)	$3,23 \cdot 10^{+1}$
GWP100a (kg CO ₂ eq/kg PIPNT)	$2,18 \cdot 10^0$
ODP (kg CFC-11 eq/kg PIPNT)	$2,84 \cdot 10^{-7}$
ToxH (kg 1,4-DB eq/kg PIPNT)	$1,8 \cdot 10^{-1}$
EtoxAD (kg 1,4-DB eq/kg PIPNT)	$2,68 \cdot 10^{-2}$
EtoxM (kg 1,4-DB eq/kg PIPNT)	$1,41 \cdot 10^{+3}$
EtoxTer (kg 1,4-DB eq/kg PIPNT)	$1,24 \cdot 10^{-3}$
OxFQ (kg C ₂ H ₄ eq/kg PIPNT)	$4,90 \cdot 10^{-4}$

Categoria d'impacte (Unitats)	PIPNT
Acidif. (kg SO ₂ eq/kg PIPNT)	$1,21 \cdot 10^{-2}$
Eutrof. (kg PO ₄₃ - eq/kg PIPNT)	$8,57 \cdot 10^{-4}$
OcTerA (m ² a/kg PIPNT)	$1,98 \cdot 10^{-2}$
OcTerU (m ² a/kg PIPNT)	$6,74 \cdot 10^{-3}$
OcTerN (m ² /kg PIPNT)	$4,31 \cdot 10^{-5}$

Aquests valors corresponen únicament al procés de trituració i assecat sense tenir en compte els impactes de l'estabilització de les plomes. Si es comparen els impactes del procés d'estabilització de les plomes (Taula 6-1) i de la trituració de les plomes estabilitzades (Taula 6-5) s'observa que l'impacte de la trituració és més gran en tots els casos, tal i com s'ha representat gràficament a continuació:



Gràfica 6-5: Comparació dels impactes d'estabilitzar 1kg de PIPN amb autoclau i obtenir 1 kg de PIPNT a partir de PIPN utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Aquestes diferències són degudes al consum elèctric del procés, que en el cas de la trituració és gairebé 13 vegades superior (14,1 kJ/g PIP) respecte al d'estabilització (1,1 kJ/g PIP). Com a exemple d'aquestes diferències es mostra la part principal de l'anàlisi de flux dels impactes per a la fabricació d'una placa amb un 20% de plomes per la categoria d'impacte d'esclafament global.

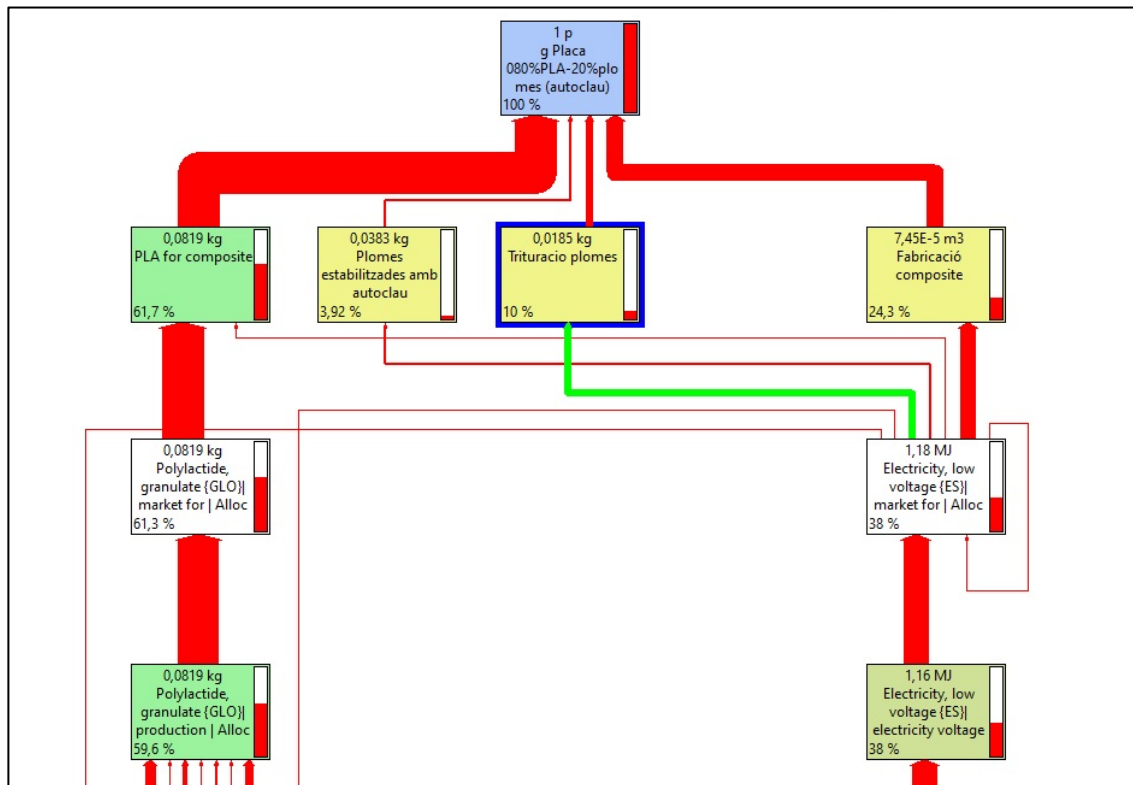


Figura 6-1: Arbre de caracterització de la categoria escalfament global d'una placa amb un 20% de plomes.

Les línies de connexió d'aquesta anàlisi de flux tenen un gruix proporcional al valor del flux en cada cas i es pot observar clarament que la línia del consum energètic de la trituració de les plomes (marcada en verd) és clarament més gruixuda que la de l'estabilització de les plomes. Pel cas concret d'aquesta categoria, el mix energètic espanyol té una contribució del 38% a l'impacte total. Si es desglossa l'impacte del mix energètic en els diferents processos que l'utilitzen es pot observar que en la categoria d'escalfament global un 9,91% de l'impacte correspon a l'energia utilitzada per triturar les plomes, mentre que la contribució de l'electricitat utilitzada en el procés d'estabilització és del 2,92% de l'impacte total, tal i com es pot veure a la taula següent:

Taula 6-6: Percentatge de contribució del consum d'electricitat en cada procés de la fabricació d'una placa amb un 80% de plomes.

Procés: Electricity, low voltage (ES), market for	
Flux	Percentatge sobre l'impacte total
Fluxos de sortida	38%
Fabricació del composite	24%
Trituració de les plomes	9,91%
Estabilització de les plomes amb autoclau	2,92%
PLA	0,42%
Altres fluxos	0,75%

6.1.3. Resultat de l'avaluació de l'impacte del procés de fabricació de la placa de material compòsit

Una vegada avaluats els impactes d'estabilitzar i triturar les plomes de pollastre queda avaluar els del procés de fabricació de la placa de material compòsit. Els materials de la placa són les plomes estabilitzades i triturades (PIPNT) i el PLA. Aquests dos materials es fonen i es barregen en una mescladora i posteriorment es premsen per obtenir la placa de material tal i com s'ha explicat al capítol 5.2.1.5.

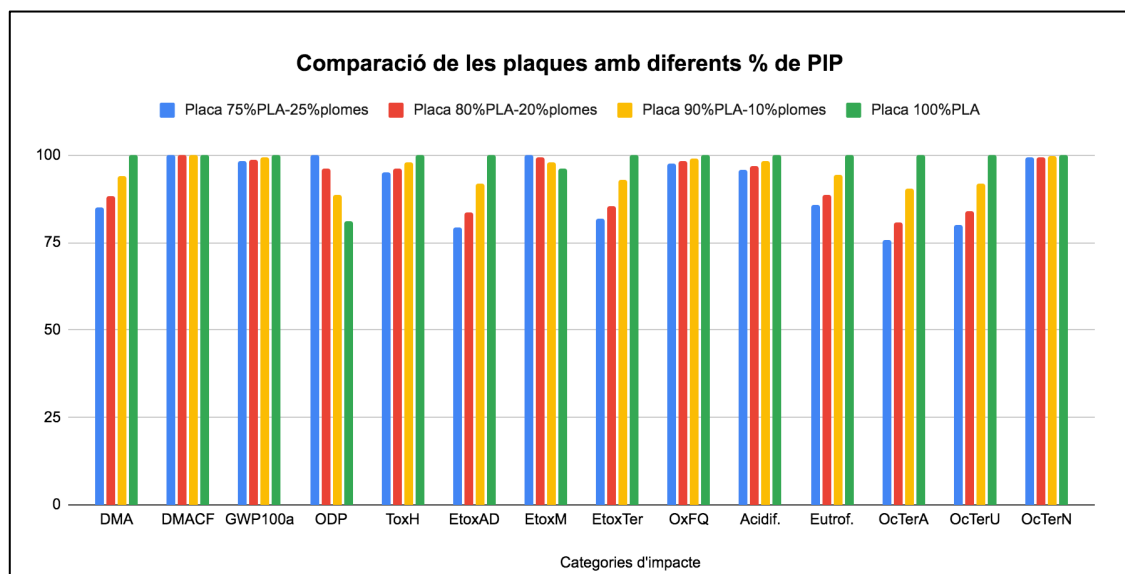
Per poder fer la caracterització dels impactes de la fabricació d'una placa de material compòsit PLA/PIP a partir de plomes estabilitzades amb autoclau, s'ha utilitzat les dades d'inventari dels processos d'estabilització amb autoclau (Taula 5-7: Dades d'inventari del procés d'estabilització, rentat i desinfecció de les plomes de pollastre amb tensioactiu), de trituració (Taula 5-10: Dades d'inventari del procés de trituració de la ploma) i de fabricació de la placa (Taula 5-12: Dades d'inventari de la fabricació de la placa).

Tot i que a nivell de laboratori s'han fabricat plaques amb diferents percentatges de PIP a les plaques, en aquest treball s'ha avaluat l'impacte ambiental de les que compleixen els requeriments de propietats mecàniques definits a la UF (obtenció d'una placa de material compòsit de dimensions 184 x 184 x 2,2 mm amb un Mòdul de Young superior a 2500 MPa) tal i com s'ha exposat al capítol 5.2. Els resultats de la caracterització d'aquests impactes són:

Taula 6-7: Dades de caracterització de l'obtenció de la UF utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat excloent els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Categoria d'impacte (Unitats)	Placa 75%PLA-25%plomes	Placa 80%PLA-20%plomes	Placa 90%PLA-10%plomes	Placa 100% PLA
DMA (kg Sb eq/UF)	$6,81 \cdot 10^{-8}$	$7,05 \cdot 10^{-8}$	$7,51 \cdot 10^{-8}$	$7,98 \cdot 10^{-8}$
DMACF (MJ/UF)	$5,60 \cdot 10^0$	$5,60 \cdot 10^0$	$5,57 \cdot 10^0$	$5,57 \cdot 10^0$
GWP100a (kg CO ₂ eq/UF)	$4,00 \cdot 10^{-1}$	$4,01 \cdot 10^{-1}$	$4,02 \cdot 10^{-1}$	$4,05 \cdot 10^{-1}$
ODP (kg CFC-11 eq/UF)	$3,28 \cdot 10^{-8}$	$3,16 \cdot 10^{-8}$	$2,89 \cdot 10^{-8}$	$2,64 \cdot 10^{-8}$
ToxH (kg 1,4-DB eq/UF)	$3,77 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$3,87 \cdot 10^{-2}$	$3,95 \cdot 10^{-2}$
EtoxAD (kg 1,4-DB eq/UF)	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$
EtoxM (kg 1,4-DB eq/UF)	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$
EtoxTer (kg 1,4-DB eq/UF)	$6,27 \cdot 10^{-4}$	$6,55 \cdot 10^{-4}$	$7,09 \cdot 10^{-4}$	$7,65 \cdot 10^{-4}$
OxFQ (kg C ₂ H ₄ eq/UF)	$9,25 \cdot 10^{-5}$	$9,29 \cdot 10^{-5}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$	$9,42 \cdot 10^{-5}$
Acidif. (kg SO ₂ eq/UF)	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	$2,53 \cdot 10^{-3}$
Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/UF)	$5,23 \cdot 10^{-4}$	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$5,74 \cdot 10^{-4}$	$6,09 \cdot 10^{-4}$
OcTerA (m ² a/UF)	$8,16 \cdot 10^{-2}$	$8,68 \cdot 10^{-2}$	$9,72 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$
OcTerU (m ² a/UF)	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$5,15 \cdot 10^{-3}$	$5,64 \cdot 10^{-3}$	$6,13 \cdot 10^{-3}$
OcTerN (m ² /UF)	$7,88 \cdot 10^{-6}$	$7,90 \cdot 10^{-6}$	$7,88 \cdot 10^{-6}$	$7,90 \cdot 10^{-6}$

Observant amb detall aquests valors es pot veure que l'increment de percentatge de PIPNT al material implica canvis en l'impacte del material. En la majoria de categories l'impacte disminueix en afegir plomes al material compost, però en algunes categories com l'esgotament de la capa d'ozó, l'ecotoxicitat marina l'impacte s'incrementa amb l'addició de plomes al material. Aquesta tendència es pot veure gràficament a la Gràfica 6-6 on s'ha assignat el valor de 100 a l'impacte més gran de cada categoria i s'ha recalculat la resta en funció d'aquest.



Gràfica 6-6: Comparació dels impactes d'obtenir la UF amb diferents percentatges de ploma utilitzant el mètode CML-IA EU25 modificat explotant els processos d'infraestructura i les emissions a llarg termini.

Aquestes dades permeten comprovar els beneficis ambientals de la introducció de PIP al material compòsit, ja que per una banda es disminueixen els impactes de l'ús de PLA i per altra banda s'eviten els impactes corresponents al tractament de les PIP com a residu. Cal recordar, que aquests impactes evitats no s'han tingut en compte en aquest estudi al considerar les PIP com a co-producte sense càrregues ambientals segons la metodologia PEF i que ja s'ha explicat anteriorment (apartat 5.2.3)

A partir d'aquestes dades es pot procedir a una anàlisi més detallada de la contribució de cada procés a l'impacte final. A la següent taula es presenten els valors de normalització per la placa que conté un 80% de PLA:

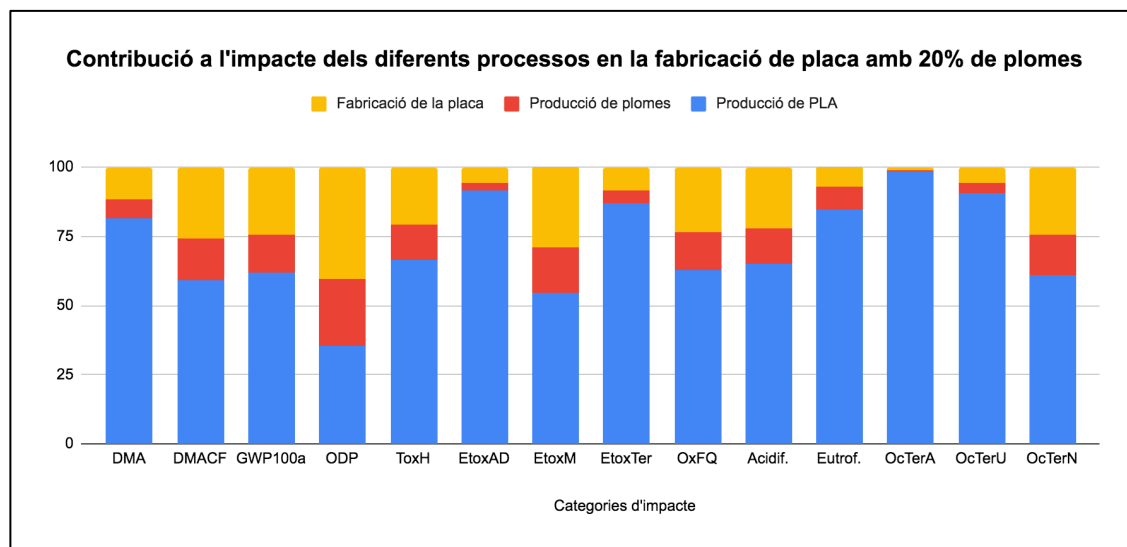
Taula 6-8: Valors de normalització d'una placa 80% PLA i 20% PIPNT seguint el mètode CML-IA modificat

Categoria d'impacte	Producció de PLA	Producció de PIPNT ⁵	Fabricació de la placa
DMA (kg Sb eq/UF)	$5,73 \cdot 10^{-8}$	$4,81 \cdot 10^{-9}$	$8,35 \cdot 10^{-9}$
DMACF (MJ/UF)	$3,32 \cdot 10^0$	$8,28 \cdot 10^{-1}$	$1,45 \cdot 10^0$
GWP100a (kg CO ₂ eq/UF)	$2,48 \cdot 10^{-1}$	$5,59 \cdot 10^{-2}$	$9,76 \cdot 10^{-2}$

⁵ Producció de PIPNT inclou l'estabilització de les plomes amb autoclau i la trituració de les plomes.

Categoria d'impacte	Producció de PLA	Producció de PIPNT ⁵	Fabricació de la placa
ODP (kg CFC-11 eq/UF)	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$7,71 \cdot 10^{-9}$	$1,28 \cdot 10^{-8}$
ToxH (kg 1,4-DB eq/UF)	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$4,77 \cdot 10^{-3}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$
EtoxAD (kg 1,4-DB eq/UF)	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$6,86 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$
EtoxM (kg 1,4-DB eq/UF)	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$3,65 \cdot 10^{-1}$	$6,31 \cdot 10^{-1}$
EtoxTer (kg 1,4-DB eq/UF)	$5,68 \cdot 10^{-4}$	$3,09 \cdot 10^{-5}$	$5,57 \cdot 10^{-5}$
OxFQ (kg C ₂ H ₄ eq/UF)	$5,82 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$2,20 \cdot 10^{-5}$
Acidif. (kg SO ₂ eq/UF)	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$3,17 \cdot 10^{-4}$	$5,43 \cdot 10^{-4}$
Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/UF)	$4,57 \cdot 10^{-4}$	$4,49 \cdot 10^{-5}$	$3,84 \cdot 10^{-5}$
OcTerA (m ² a/UF)	$8,54 \cdot 10^{-2}$	$5,68 \cdot 10^{-4}$	$8,89 \cdot 10^{-4}$
OcTerU (m ² a/UF)	$4,67 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$
OcTerN (m ² /UF)	$4,81 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$

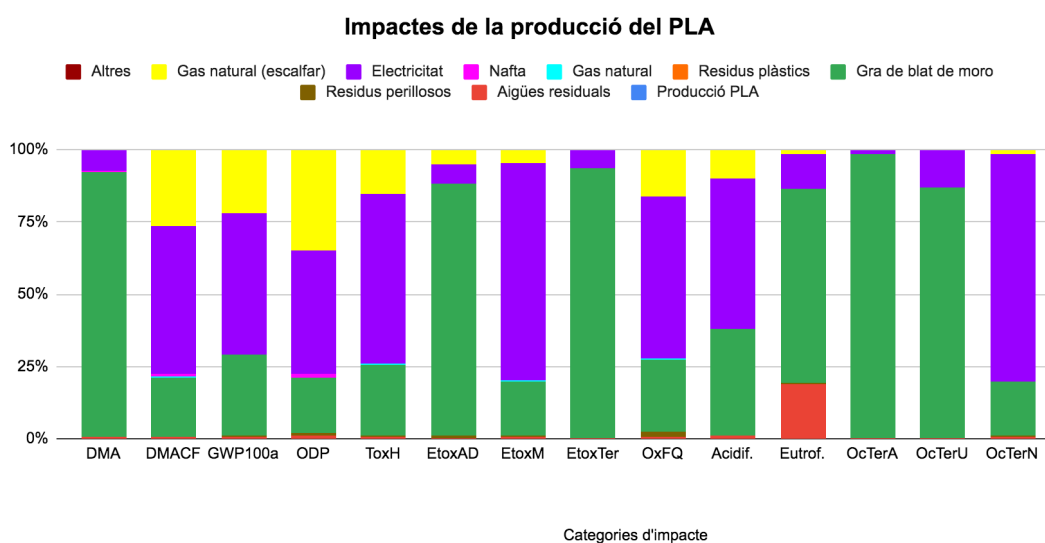
La representació gràfica d'aquests valors (Gràfica 6-7) permet veure clarament que la producció del PLA contribueix a més del 50% de l'impacte del material per totes les categories excepte en la d'esgotament de la capa d'ozó (ODP), on l'impacte major recau en la fabricació de la placa.



Gràfica 6-7: Valors de normalització d'una placa 80% PLA i 20% PIPNT seguint el mètode CML-IA modificat

Després de l'impacte de produir el PLA, el que té més influència en la majoria de les categories (totes menys eutrofització) és la fabricació de la placa seguit del pretractament de les plomes.

Aquests resultats porten a fer una anàlisi detallada dels impactes de la producció del PLA on es pot observar que els impactes més elevats són la producció de blat de moro i el consum energètic de la planta de producció del PLA:



Gràfica 6-8: Contribució de les etapes de producció del PLA a les categories d'impacte.

6.2. Interpretació dels resultats

Els resultats obtinguts corroboren que l'addició de plomes al PLA porta a l'obtenció d'un material amb menor impacte ambiental. Això permet pensar en aplicacions industrials d'aquest material compost en substitució d'altres materials amb més impacte.

L'etapa de major impacte és la de fabricació de la placa i dins d'aquesta etapa la producció del PLA és la part del procés que té una contribució més elevada. Aquest fet pot fer pensar en el canvi de la matriu de PLA per una altra matriu amb l'objectiu de millorar encara més l'impacte sobre el medi del material. Però observant els impactes de la resta de plàstics es pot comprovar que el PLA és un dels bioplàstics amb menor impacte ambiental (Álvarez-Chávez, Edwards, Moure-Eraso, & Geiser, 2012; Cheung, Ho, Lau, Cardona, & Hui, 2009; Madival, 2009; Vink, Glassner, Kolstad, Wooley, & O'Connor, 2007). Per

tant el PLA és un bon material per ser utilitzat com a matriu pensant en l'obtenció de productes amb un baix impacte ambiental.

Le Duigou constata una elevada contribució del PLA a l'impacte ambiental del material compost amb fibres cel·lulòsiques naturals com el lli (Le Duigou, 2012). En aquest cas la contribució del PLA a l'impacte ambiental és similar a la contribució del PLA a l'impacte ambiental del compost amb plomes de pollastre, excepte en les categories d'impacte d'acidificació, escalfament global i esgotament de la capa d'ozó on l'impacte relatiu del PLA és inferior pel material fet amb plomes de pollastre. Tot i així, es pot concloure que des del punt de vista ambiental les plomes de pollastre són una alternativa interessant per produir materials amb poc impacte ambiental.

Si s'avaluen els altres processos es veu clarament que el consum energètic és un factor clau en l'impacte del material compost en totes les etapes del cicle de vida, per tant una possible via per millorar l'impacte seria augmentar l'eficiència energètica del procés i/o buscar fonts energètiques alternatives amb un menor impacte ambiental com poden ser les energies renovables.

Un altre punt de millora seria buscar la disminució de l'impacte del PLA en el material, ja sigui augmentant el percentatge de plomes admissible al material (afegint agents d'acoblament, per exemple) línia de recerca investigada per altres membres de l'equip (Casadesús et al., 2018), o millorant el procés de producció del PLA per disminuir-ne l'impacte.

Arribats a aquest punt és important fer algunes consideracions sobre l'ús de plomes de pollastre com a reforç de materials composts:

En primer lloc, la incorporació de residus d'origen orgànic, com les PIP, als materials composts implica que aquestes no seran abocades o incinerades i per tant que els impactes d'aquests tractaments finalistes del residu no es generaran. Malauradament a Catalunya no es recullen les plomes de forma separada de la resta de residus de l'escorxador i no és possible tenir les dades exactes de l'impacte del tractament final de les plomes de pollastre com a residu. Es cas de tenir aquestes dades, es podria calcular l'impacte d'aquests tractaments i avaluar-ne el seu impacte en el procés complet de producció del pollastre i del material compost.

Tampoc es pot oblidar que l'ús de PIP com a reforç en materials compòsits redueix l'ús d'altres materials, com les fibres cel·lulòsiques, i l'ús de matrius polimèriques, tant d'origen natural (com el PLA) o procedents de combustibles fòssils com els termoplàstics convencionals i permet conservar recursos per a altres usos o per a les futures generacions.

Pel que fa a les fibres, cal avaluar en cada cas el tractament que és necessari per cada fibra per tal de poder-la introduir al material compòsit, que pot ser molt diferent si es tracta de fibres que són residus de la producció o si són fibres plantades expressament per tenir fibres cel·lulòsiques. En aquest últim cas, cal tenir en compte la competència amb la producció d'aliments per a la població a l'hora de valorar els impactes.

Actualment, les plomes de pollastre es consideren un residu sense valor de la producció de carn de pollastre i per això no es té en compte el seu impacte en la producció del material compòsit. Però caldria avaluar si aquest impacte és significatiu en l'impacte total del material per si algun dia aquestes plomes tenen un valor a la cadena de producció i per tant cal incloure la cria del pollastre en l'impacte del material. En aquest sentit s'ha fet l'assignació de les càrregues ambientals d'aquest impacte al capítol 6.3.

Un altre factor a tenir en compte és la reciclabilitat del material. En general, els materials compòsits són difícils de reciclar, degut a que estan formats per diferents materials que difícilment es poden separar. Però el fet d'utilitzar una matriu i un reforç biodegradables permet la valorització del material per ser transformat en compost (Vidal, 2009).

Tampoc podem menystenir que l'addició de PIP no canvia la densitat del material i per tant l'impacte del transport del material i del producte final no es veurà incrementat degut a l'augment de la densitat del material. Cosa que sí que succeiria en la majoria de fibres cel·lulòsiques que tenen densitats superiors a les de les PIP (Salvador et al., 2008) i per tant, sí que podrien contribuir a un major impacte en aquesta fase del cicle de vida del producte.

Aquest resultat ens permeten concloure que l'ús de plomes de pollastre en materials compòsits són una bona opció de cara a obtenir un material amb un menor impacte ambiental, tot i que cal seguir investigant per tal d'optimitzar el procés de producció del material i d'obtenció de les plomes.

6.3. Assignació de càrregues ambientals: influència de la cria i matança del pollastre

Tal i com s'ha dit a les conclusions anteriors es considera important avaluar quin seria l'impacte de la cria i matança del pollastre en el material en cas que les plomes adquirissin un valor i calgués considerar aquest flux. Per fer aquesta anàlisi ens hem basat en diferents articles que s'han fet sobre l'impacte de la producció de carn de pollastre a nivell mundial (Cesari, 2017; González-García et al., 2014; Kalhor, 2016; Prudêncio da Silva et al., 2014b; Skunca, 2018). L'abast d'aquest estudi difereix en factors com la zona de cria, el sistema de producció i les etapes que es tenen en compte. Pel que fa a les etapes hi ha estudis que inclouen tot el procés del pollastre: la granja, l'escorxador, el processat de la carn, la venda al detall i l'ús a casa i d'altres que inclouen només algunes d'aquestes etapes. En el cas concret d'aquesta tesi s'han tingut en compte els que ofereixen dades de l'impacte fins a l'escorxador, ja que a partir d'aquí les plomes són separades del pollastre i ja formen part de sistemes diferents.

Taula 6-9: Resum d'estudis d'impacte ambiental de les etapes de creixement i matança de la producció de carn de pollastre per UF de cada estudi. Elaboració pròpia a partir de les fonts indicades a la taula.

Autors	Mostra	UF	Impacte ambiental		
			GWP100a (kg CO ₂ eq/UF)	Acidif. (kg SO ₂ eq/UF)	Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/UF)
(Cesari, 2017)	80 granges de pollastre i escorxadors a Itàlia	1 kg de carcassa a la sortida de l'escorxador	$55,2 \cdot 10^{-1}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$
(Kalhor, 2016)	40 granges de pollastre i escorxadors a Iran a l'estiu	1 tona de carn de pollastre a la sortida de l'escorxador	$2,93 \cdot 10^{+3}$	$4,18 \cdot 10^{+1}$	$1,47 \cdot 10^{+1}$
	40 granges de pollastre i escorxadors a Iran a l'hivern	1 tona de carn de pollastre a la sortida de l'escorxador	$5,36 \cdot 10^{+3}$	$6,19 \cdot 10^{+1}$	$1,93 \cdot 10^{+1}$
(González-García et al., 2014)	Granges de pollastre i escorxadors a Portugal	1,2 kg de carn preparada per ser distribuïda a la sortida de l'escorxador	$3 \cdot 10^0$	$5,31 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^{-2}$
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	Producció de pollastre a França a l'oest de França	1 tona de pollastre envasat a la sortida de l'escorxador	$3,18 \cdot 10^{+3}$	$4,05 \cdot 10^{+1}$	$2,1 \cdot 10^{+1}$

Autors	Mostra	UF	Impacte ambiental		
			GWP100a (kg CO ₂ eq/UF)	Acidif. (kg SO ₂ eq/UF)	Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/UF)
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	Producció de pollastre a França al sud-oest de França amb etiqueta vermella	1 tona de pollastre envasat a la sortida de l'escorxador	$4,02 \cdot 10^{+3}$	$6,94 \cdot 10^{+1}$	$2,99 \cdot 10^{+1}$
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	Producció de pollastre al Brasil al centre-oest del Brasil	1 tona de pollastre envasat a la sortida de l'escorxador	$2,75 \cdot 10^{+3}$	$4,18 \cdot 10^{+1}$	$1,99 \cdot 10^{+1}$
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	Producció de pollastre al Brasil al sud del Brasil	1 tona de pollastre envasat a la sortida de l'escorxador	$1,95 \cdot 10^{+3}$	$4,59 \cdot 10^{+1}$	$2,05 \cdot 10^{+1}$
(Skunca, 2018)	Escenaris de producció a Servia	1 kg de carn de pollastre consumida	$2,78 \cdot 10^0$	$8,07 \cdot 10^{-2}$	-

A la Taula 6-9 es presenten diferents valors d'impacte associats a les etapes de creixement i matança del pollastre. Es pot veure una gran variabilitat en les dades, i això és degut a que les UFs són diferents en cada cas i es centren en sistemes de producció i localitzacions geogràfiques diferents. Per veure si aquests valors influeixen molt o poc en l'impacte del material compost proposat cal fer la transformació d'aquestes dades a una única UF per tal de poder comparar els valors. La comparació s'ha fet amb una placa amb el 20% de plomes, ja que cada placa té un valor de plomes diferent. S'ha optat per unificar totes les UF a la unitat funcional d'aquesta tesi. Per poder-ho fer, les unitats de pes han estat passades totes a grams, s'ha considerat que la relació màssica entre la carcassa i el pollastre viu és de 0,7 tal i com diu da Silva al seu article (Prudêncio da Silva et al., 2014b), que un pollastre té un 7% en pes de plomes i que en una placa de material (UF) hi ha 34,61g de plomes brutes tal i com es pot calcular a partir de les dades d'inventari. Les dades obtingudes a partir d'aquest càlcul es mostren a la Taula 6-10:

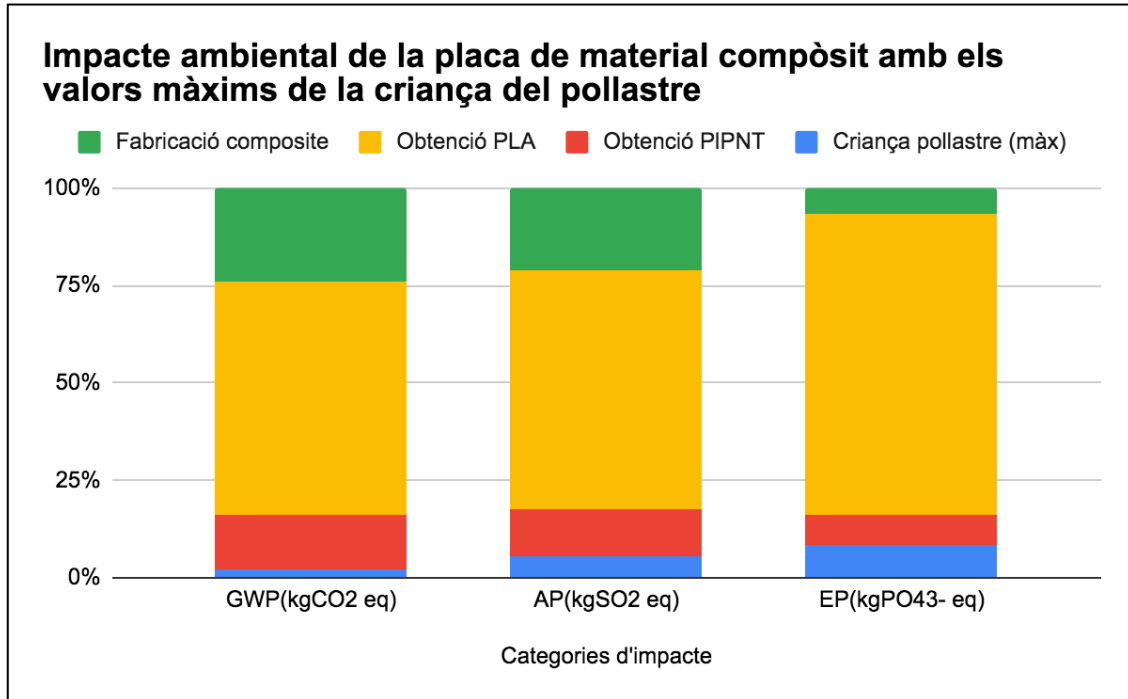
Taula 6-10: Resum d'estudis d'impacte ambiental de les etapes de creixement i matança de la producció de carn de pollastre per UF d'aquesta tesi. Elaboració pròpia a partir de les fonts indicades a la taula.

Autors	Impacte ambiental		
	GWP100a (kg CO ₂ eq/UF)	Acidif. (kg SO ₂ eq/UF)	Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq/UF)
(Cesari, 2017)	$9,44 \cdot 10^{-3}$	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$
(Kalhor, 2016)	$5,01 \cdot 10^{-3}$	$7,14 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$
	$9,16 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$
(González-García et al., 2014)	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$7,57 \cdot 10^{-5}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	$5,44 \cdot 10^{-3}$	$6,93 \cdot 10^{-5}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	$6,87 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$5,11 \cdot 10^{-5}$
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	$4,70 \cdot 10^{-3}$	$7,15 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-5}$
(Prudêncio da Silva et al., 2014b)	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$7,85 \cdot 10^{-5}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$
(Skunca, 2018)	$4,99 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	

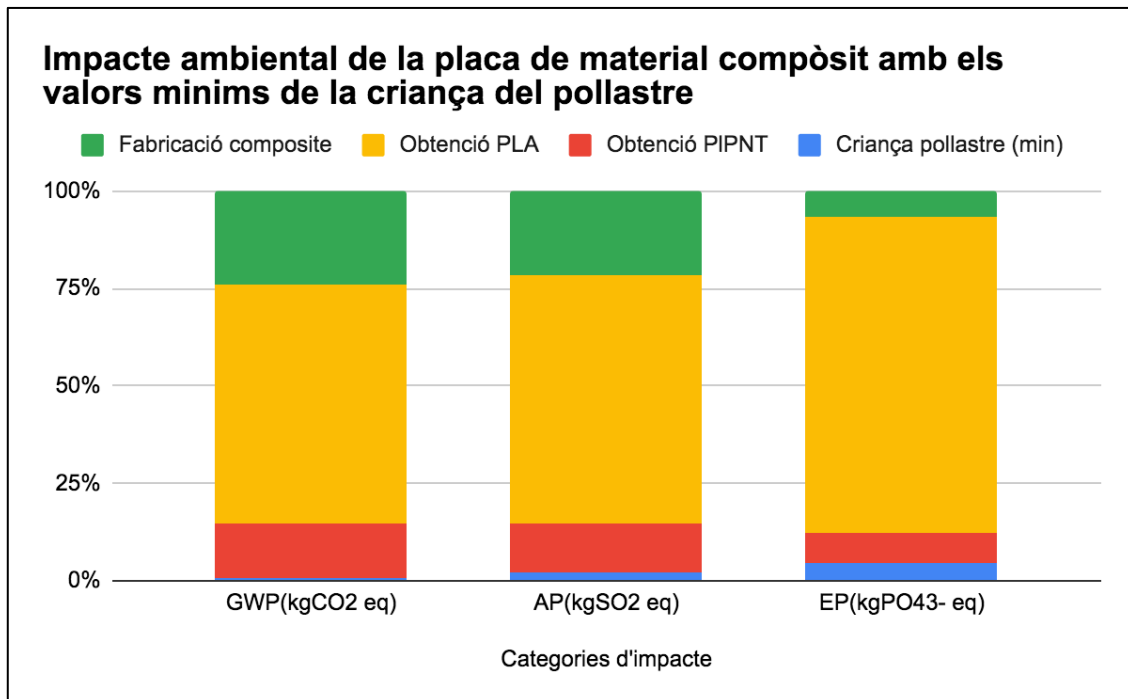
A partir de les dades de l'impacte del pollastre fins a la sortida de l'escorxador, s'ha recalculat l'impacte del material compost tenint en compte aquesta etapa. Degut a la variabilitat de les dades de l'impacte de la cria del pollastre, s'ha optat per veure la influència tenint en compte el valor màxim i el valor mínim en cada cas. A continuació es presenten els valors d'impacte de cada etapa (Taula 6-11) i també unes gràfiques per veure millor la importància relativa de cada etapa (Gràfica 6-9 i Gràfica 6-10).

Taula 6-11: Valors d'impacte de la placa de material compost amb un 20% de plomes i de la cria del pollastre fins a l'escorxador per UF.

Categoria d'impacte	Impacte				
	Màxim Pollastre	Mínim Pollastre	Obtenció PIPNT	Obtenció PLA	Fabricació composite
GWP100a (kgCO ₂ eq)	$9,44 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$5,59 \cdot 10^{-2}$	$2,48 \cdot 10^{-1}$	$9,76 \cdot 10^{-2}$
Acidif. (kgSO ₂ eq)	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$3,17 \cdot 10^{-4}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$5,43 \cdot 10^{-4}$
Eutrof. (kg PO ₄ ³⁻ eq)	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$	$4,49 \cdot 10^{-5}$	$4,57 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-5}$



Gràfica 6-9: Impactes de l'obtenció de la placa de material compòsit amb els valors màxims de la cria del pollastre.



Gràfica 6-10: Impactes de l'obtenció de la placa de material compòsit amb els valors mínims de la cria del pollastre.

Aquestes dades indiquen que l'etapa de cria i matança del pollastre té una importància relativament baixa en tots els casos. El seu valor és inferior al 5% de l'impacte total excepte per la categoria d'eutrofització que tenint en compte el valor màxim d'impacte de les plomes on el valor puja fins a un 7,50%.

6.4. Bibliografia

- Casadesús, M., Macanás, J., Colom, X., Cañavate, J., Álvarez, M. D., Garrido, N., Molins, G., & Carrillo, F. (2018). Effect of chemical treatments and additives on properties of chicken feathers thermoplastic biocomposites. *Journal of Composite Materials*.
<https://doi.org/10.1177/0021998318766652>
- Cesari, V. (2017). Environmental impact assessment of an Italian vertically integrated broiler system through a Life Cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 143, 904.
<http://mendeley.csuc.cat/fitxers/c000f33ecc5a4be00839b37fd0d3caa2>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M. A. J., Schryver, A. De, Struijs, J., & Zelm, R. van. (2013). *ReCiPe 200 8 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*.
- González-García, S., Gomez-Fernández, Z., Dias, A. C., Feijoo, G., Moreira, M. T., & Arroja, L. (2014). Life Cycle Assessment of broiler chicken production: a Portuguese case study. *Journal of Cleaner Production*, 74, 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.067>
- Heijungs, R., Huppes, G., & Guinee, J. (2010). Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis. In *Polymer degradation and stability* (Vol. 95, Issue 3, pp. 422–428). Elsevier.
- Kalhor, T. (2016). Environmental impact assessment of chicken meat production using life cycle assessment. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 262.
<http://mendeley.csuc.cat/fitxers/52c991ec57d2ec05bf21824dba1ad6a6>
- PRé Consultants. (2014). *SimaPro 8.0 Life Cycle Assessment Software Package* (8.0). PRé Consultants. www.pre.nl
- Prudêncio da Silva, V., van der Werf, H. M. G., Soares, S. R., & Corson, M. S. (2014). Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: an LCA approach. *Journal of Environmental Management*, 133, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.011>
- Salvador, M., Nuez, A., Sahuquillo, O., Llorens, R., & Martí, F. (2008). Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas. *Universidad Politécnica de Valencia*.

Skunca, D. (2018). Life cycle assessment of the chicken meat chain. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 184, 440. <http://mendeley.csuc.cat/fitxers/ac38738dcff74c8ce209aead3a613e3>

7. Conclusions finals

Després d'avaluar els impactes ambientals de la producció d'un material compòsit amb plomes de pollastre s'ha pogut comprovar que l'aplicació d'aquest residu de la indústria aviar pot aportar beneficis des del punt de vista ambiental.

En primer lloc s'han fixat les condicions de producció del material basant-se en les propietats mecàniques del material per tal que sigui aplicable en algun sector industrial amb la major càrrega possible de plomes de pollastre. Aquestes condicions s'han descrit detalladament al Capítol 3 i la temperatura de processat ha d'estar per sota dels 190°C i els temps de mescla ha de ser inferior als 15 minuts per evitar la degradació de les propietats del material compòsit. Així, s'ha optat per definir una temperatura de processat de 180°C, un temps de mescla de 5 minuts i una velocitat de 50 rpm com a condicions de processat del material per a l'estudi de les propietats mecàniques i de l'impacte ambiental.

Una vegada establertes les condicions de processat del material, s'ha procedit a avaluar les seves propietats mecàniques observant que l'addició de PIP al PLA redueix la resistència a la tracció i l'allargament a la ruptura, però té poc efecte sobre el mòdul de Young. El percentatge d'absorció d'aigua augmenta amb l'addició de plomes al material i en canvi la densitat del material compòsit és similar a la del PLA tot i augmentar la quantitat de plomes que conté. Els estudis de compatibilitat mostren una feble interacció

entre fibra i matriu que pot ser la causant de la reducció de les propietats mecàniques. Així doncs, l'estudi suggereix que les PIP es poden utilitzar com a càrrega per reduir la quantitat de polímer necessari per fer un producte, però no es poden considerar material de reforç. En general, s'ha pogut veure que els materials compòsits PLA/PIP tenen propietats comparables a alguns papers i cartons i també a alguns materials de fusta. Aquesta similitud fa pensar en possibles aplicacions industrials per substituir aquests materials, com pot ser en el sector de l'embalatge o en elements decoratius que no necessitin valors elevats de resistència a la tracció.

A partir d'aquí s'ha procedit a fer l'avaluació de l'impacte ambiental del material mitjançant una anàlisi de cicle de vida (ACV) que s'ha descrit detalladament abans de procedir a la seva aplicació al compòsit estudiat. En primer lloc s'han analitzat dos tractaments d'estabilització i desinfecció de les PIP: un proposat per la regulació SANDACH (estabilització amb vapor) i un altre proposat a diferents patents (estabilització amb tensioactiu). Aquesta avaluació ha permès constatar que el pretractament de les PIP amb vapor té menys impactes ambientals en gran part degut al menor consum elèctric i d'aigua del procés. Una vegada seleccionat el pretractament recomanat per la regulació SANDACH s'ha avaluat l'impacte ambiental associat a la fabricació del material que inclou l'estabilització de les PIP amb vapor d'aigua, la seva trituració i la fabricació del material de PLA i PIP. Els resultats d'aquest estudi permeten concloure que la introducció de plomes a un material fet amb PLA dona lloc a un material amb un menor impacte ambiental que el material de PLA pur, tot i no millorar les propietats mecàniques del material.

Analitzant amb profunditat l'impacte d'aquest material s'ha constatat que la producció del PLA és el procés amb major impacte en la fabricació del material, i que dins del PLA els processos més importants a nivell d'impacte són la producció de blat de moro i el consum energètic de la planta de producció.

Pel que fa a la resta de processos analitzats, el consum elèctric és el que té més contribució en l'impacte global del material, degut a que no és negligible en els impactes de producció del PLA i és el factor més impactant tant en el processat de les plomes com en la fabricació de la placa de material.

La tesi també inclou quina seria la influència de la cria, l'engreix i la matança del pollastre en cas de tenir-la en compte en l'avaluació ambiental. En aquest cas, s'ha

constatat que els seus impactes són molt petits respecte a la producció del material i, per tant, cal centrar els esforços per disminuir l'impacte en el procés de producció del PLA i en els processos de consum i generació d'energia.

Així doncs, s'han assolit els objectius inicials de la tesi podent constatar que el procés d'estabilització per vapor d'aigua és el que té un menor impacte ambiental, que l'addició de PIP al PLA permet obtenir un material compost amb unes propietats mecàniques similars als taulers de fusta de densitat mitjana (DMF) i que varien en funció del percentatge de PIP que contingui el material. En relació als impactes ambientals es constata que l'obtenció del PLA és el procés amb major impacte ambiental i que el consum energètic és un aspecte ambiental clau dins de l'impacte total del material. També s'ha comprovat que, tot i no considerar la cria i la matança del pollastre en el sistema d'estudi degut a que són un residu sense valor del procés de producció aviar, la influència en l'impacte ambiental total del material de la cria del pollastre seria menor del 8% en el pitjor dels escenaris considerats.

7.1. Futures línies d'investigació

A partir dels resultats obtinguts en aquesta tesi i de les seves conclusions, han sorgit noves línies d'investigació, algunes d'elles ja s'han treballat i d'altres es proposa desenvolupar-les en un futur.

En primer lloc, durant aquest últims anys, s'ha aprofundit en la recerca d'aplicacions per valoritzar les PIP, ja sigui en materials composts o en altres aplicacions.

En el cas dels materials composts s'ha treballat amb altres matrius, com el polipropilè (PP) i utilitzant agents d'acoblament com el polipropilè maleat. En aquest cas, s'ha vist que el material té menor impacte ambiental en la majoria de categories d'impacte que el seu equivalent de PP reforçat amb fibra de vidre si l'aplicació és estàtica. En el cas d'aplicacions en el sector del transport, el material reforçat amb PIP té un major impacte en moltes categories degut a que per obtenir les mateixes prestacions cal més quantitat de massa del material compost fet amb PP i PIP i aquest increment de pes es veu reflectit en un major consum d'energia en la fase d'ús del material (Álvarez-del-Castillo et al., 2022; Casadesús et al., 2018).

Pel que fa a altres aplicacions s'ha investigat l'ús de PIP en materials que absorbeixin el so. Concretament s'ha produït un material no teixit incorporant fins a un 50% de PIP. Aquest material ha demostrat propietats acústiques similars, inclús millor en algunes freqüències. Pel que fa als impactes ambientals també s'ha vist que la incorporació de PIP disminueix l'impacte ambiental en la majoria de categories d'impacte estudiades (Casadesús et al., 2019b).

Una altra aplicació explorada és l'ús de les PIP com a biosorbents de coure en solucions aquoses observant-se una millor biosorció que la bentonita per concentracions baixes de coure (Casadesús, 2010).

En el cas de les aplicacions industrials dels materials PLA/PIP cal avaluar l'impacte de la fabricació del producte, del seu ús i del final de vida per a cada aplicació concreta, ja que aquesta tesi ha fet l'avaluació de l'impacte del material del bressol a la porta per tal que pugui ser utilitzat en futurs ACVs de productes concrets. En aquests estudis caldria analitzar la biodegradabilitat del material, ja que tot i ser fet a partir de materials biodegradables, pot no ser-ho en les condicions que s'apliquen actualment per biodegradar la fracció orgànica dels residus municipals o no biodegradar-se en la majoria d'entorns naturals i per tant calgui establir un circuit de recollida específic per aquest material per poder-lo sotmetre a un tractament específic per tal d'aconseguir la seva biodegradació i tancar el cicle amb la natura (Romera Castillo et al., 2022).

Una altra línia de recerca futura seria l'ús de compatibilitzadors en el material compòsit PLA/PIP per tal que les plomes poguessin actuar com a material de reforç o augmentar-ne la seva proporció en el material, de manera que es pugui ampliar el ventall d'aplicacions del material.

També es recomana ampliar aquest estudi de les propietats mecàniques i de l'impacte ambiental del material compòsit amb una avaluació dels impactes socials i econòmics. D'aquesta manera es pot fer un estudi sobre la sostenibilitat del material i dels seus usos.

7.2. Bibliografia

Álvarez-del-Castillo, M. D., Garrido-Soriano, N., Casadesús, M., Macanás, J., Molins-Duran, G., & Carrillo-Navarrete, F. (2022). Environmental Impact of Chicken Feathers Based Polypropylene

Composites Developed for Automotive and Stationary Applications and Comparison with Glass-Fibre Analogues. *Waste and Biomass Valorization*, 13(11). <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01810-0>

Casadesús, M. (2010). *Preparació i caracterització d'un residu biodegradable per a la biosorció d'espècies contaminants: Vol. PFC.*

Casadesús, M., Álvarez, M. D., Garrido, N., Molins, G., Macanás, J., Colom, X., Cañavate, J., & Carrillo, F. (2019). Environmental impact assessment of sound absorbing nonwovens based on chicken feathers waste. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.009>

Casadesús, M., Macanás, J., Colom, X., Cañavate, J., Álvarez, M. D., Garrido, N., Molins, G., & Carrillo, F. (2018). Effect of chemical treatments and additives on properties of chicken feathers thermoplastic biocomposites. *Journal of Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/0021998318766652>

Romera Castillo, C., Mallenco Fornies, R., Saá Yáñez, M., & Álvarez Salgado, X. A. (2022). Leaching and bioavailability of dissolved organic matter from petrol-based and biodegradable plastics. *Marine Environmental Research*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105607>

No hem de permetre que
algú marxi del nostre costat
sense sentir-se millor i més feliç

Santa Teresa de Calcuta

8. Annexos

Annex A: Fitxa tècnica del PLA



Biopolymers PLE 5 (GMO-free)

Poly (lactic acid)

Data Sheet

Extrusion

General properties

Polymer **PLE 5** is a thermoplastic resin derived from annually renewable resources and has been specifically developed for extrusion applications.

PLE 5 is a natural grade and can be easily extruded using conventional extruders. The properties are shown in the table below.

Material & end-use properties		
Physical properties ASTM		
Density	1.25	D-792
Melt index, g/10 min (190°C / 2,16K)	2-5	D-1238
Optical properties	Transparent	
Mechanical properties		
Yield stress, Mpa	55-58	D-882
Modulus of elasticity, Gpa	1.9-2.1	D-882
Elongation, %	5-6	D-882
Impact strength, kJ/m ²	2-2.9	D-256

Processing information

PLE 5 can be easily extruded with conventional extrusion equipment. The material is stable in the molten state, assuming the drying procedures have been followed.

Machine settings

PLE 5 can be processed on conventional extrusion machines with the following equipment:

Standard extrusion screw, smooth barrels being recommended.



PROCESS DETAILS

Start up/shut down

PLE 5 is incompatible with a great number of polyolefins and specific purging procedures have to be followed:

1. In order to avoid any contamination, the feed system must be purged.
2. The screw has to be cleaned, in general with polystyrene or polypropylene maintained at low viscosity (see processing temperatures so as to avoid product decomposition). VELOX can recommend specific purging compounds for this application.
3. **PLE 5** is introduced under the same conditions used in 2.
4. Once the **PLE 5** has been purged, the heating temperatures are reduced to the desired temperature profile.
5. On shut down, purge the machine with high viscosity polypropylene or polystyrene.

Drying

In order to optimise processing, the drying and storage conditions of the resin (i.e. moisture content less than 0.025% (250 ppm) and no viscosity change) are:

1. Drying time of **4 hours at 70 °C** or at a critical threshold of -34 °C,
2. A drying air flow of greater than 0.5 (l/s/kg) per hour of resin produced.
3. In order to avoid moisture uptake, do not expose to ambient air.
4. Keep the packaging sealed until it is ready for use and close it again rapidly if the product is not used in its entirety so as to avoid any contamination.

Temperature profile for processing	
Temperature of the polymer melt	193 °C
Feed temperature	21 °C
Filling temperature	190 °C
Compression zone	190 °C
Metering zone	190 °C
Die temperature	165 °C
Screw speed	100rpm

VELOX GmbH • Brandstwiete 1 • D - 20457 Hamburg
 fon: +49 - (0)40 - 369 688 - 0 • fax: +49 - (0)40 - 369 688 - 88 • e-mail: info@velox.com
<http://www.velox.com>



COMPOSTING

Composting is a method of waste management that enables organic materials to be recycled into a product that can be used as a fertiliser for the soil. **PLE 5** is based on polylactic acid, a repeating chain of lactic acid, which undergoes a process of degradation in two steps.

Firstly, the humidity and heat in the compost heap attack the **PLE 5** polymeric chains breaking them down to form small polymers and ultimately lactic acid. The end result of the process yields carbon dioxide, water and therefore humus, a nutrient for the soil. This degradation process depends on the temperature and the humidity.

The regulating directives and the standards for composting involve four basic criteria: the material characteristics, the biodegradation, the disintegration and the ecotoxicity.

Standards differ according to the geographical region: DIN V 54900-1 (Germany), EN 13432 (Europe), ASTM D 6400 (USA), GreenPla (Japan).

EUROPEAN TERMS OF REFERENCE

The grade **PLE 5** conforms to the directive 2002/72/EC of the Commission as amended by 2004/19/EC. There is no SML (specific migration limit) for the grade referred to above in the Commission Directive 2002/72/EC or as amended by 2002/19/EC.

It should be noted that both the fabricators and the packaging industries have the responsibility of ensuring that the present utilisation of these products is in conformity with the general and specific conditions imposed for migration. The supply of this grade respects the Directive of the Parliament and the Council of Europe 94/62/EC of December 1994 for packaging and for heavy metals contained in packaging wastes described in Article 11. It can be recovered in the form of recycled materials, recovered energy, composting, and is biodegradable according to annex II point 3, subject to the standards of the local community. For further information do not hesitate to contact VELOX on this subject.

RECOMMENDATIONS FOR STORAGE

The resin silos recommended are designed to keep the air dry in the silo and isolated from the exterior. This design is in contrast to a system of open silos, such as a typical resin silo for polystyrene. To attain this objective, the key devices added to a typical resin silo (e.g. for polystyrene) include an air vortex, a rotary valve loading

VELOX GmbH • Brandstwiete 1 • D - 20457 Hamburg
fon: +49 - (0)40 - 369 688 - 0 • fax: +49 - (0)40 - 369 688 - 88 • e-mail: info@velox.com
<http://www.velox.com>



system and a pressure relief valve. The dry air introduced into the system is calibrated according to the outflow of resin from the silo.

Usually, resin producers recommend the use of aluminium or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-steel.

If the product is stored in containers outside, then any measures taken must respect the climatic conditions; these can have an impact under certain conditions (see paragraph 7 of the safety data sheet).

Creation date: 9/07/2007

Modification date: 23/01/2008

Annex B: Resultats de les proves de propietats mecàniques

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
1-170-5-50	Mòdul Young (MPa)							2907,96	2927,09	2917,53	13,53
	Resistència a tensió màxima (MPa)							21,81	22,28	22,04	0,33
	Deformació a tensió màxima (%)							1,31	1,26	1,56	0,39
	Resistència a la ruptura (N)							102,04	41,33	71,69	42,93
	Deformació a la ruptura (%)							2,01	1,49	1,75	0,37
2-170-5-75	Mòdul Young (MPa)	2803,44	2973,32	3048,65	3286,62	3262,64	3103,92	2873,03	2744,57	3012,02	201,37
	Resistència a tensió màxima (MPa)	21,15	21,87	21,92	24,37	22,32	21,93	17,18	18,62	21,17	2,26
	Deformació a tensió màxima (%)	1,08	0,99	1,08	1,08	0,85	0,97	0,76	0,96	0,97	0,12
	Resistència a la ruptura (N)	39,55	41,01	265,91	36,86	258,48	26,51	228,43	31,93	116,09	112,26
	Deformació a la ruptura (%)	1,18	1,12	1,28	1,55	0,92	1,18	0,83	1,12	1,15	0,22
3-170-5-100	Mòdul Young (MPa)	3306,27	3350,27	3639,03	3409,20	3438,27	3206,73	3272,31	2863,71	3310,73	222,79
	Resistència a tensió màxima (MPa)	25,44	26,06	28,05	26,63	22,79	21,98	24,09	21,01	24,51	2,45
	Deformació a tensió màxima (%)	1,26	1,18	1,19	1,19	0,94	0,97	1,09	1,08	1,11	0,11
	Resistència a la ruptura (N)	51,65	50,18	47,21	61,01	185,21	35,81	312,77	275,09	127,37	113,67

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,54	1,56	1,98	2,03	1,10	1,13	1,96	1,21	1,56	0,39
4-170-10-50	Mòdul Young (MPa)	3100,87	3296,89	3114,72	3252,69	3091,15	3221,16	3355,07	2816,94	3156,19	167,75
	Resistència a tensió màxima (MPa)	23,89	27,23	22,63	24,34	22,95	24,20	24,40	21,10	23,84	1,77
	Deformació a tensió màxima (%)	1,15	1,13	1,19	1,13	1,10	1,08	1,09	1,32	1,15	0,08
	Resistència a la ruptura (N)	37,81	43,27	40,59	47,89	50,32	48,03	39,38	47,68	44,37	4,71
	Deformació a la ruptura (%)	1,69	1,71	1,79	1,66	1,84	1,79	1,58	1,91	1,74	0,11
5-170-10-75	Mòdul Young (MPa)	2812,74	2545,77	3117,94	3017,26	3040,15	2957,22			2915,18	207,78
	Resistència a tensió màxima (MPa)	22,86	19,14	23,26	24,06	22,55	20,61			22,08	1,84
	Deformació a tensió màxima (%)	1,21	0,96	1,14	1,14	0,97	1,15			1,10	0,10
	Resistència a la ruptura (N)	49,36	30,21	54,73	50,41	29,69	268,52			80,49	92,74
	Deformació a la ruptura (%)	1,76	1,05	1,55	1,46	1,21	1,49			1,42	0,25
6-170-10-100	Mòdul Young (MPa)	3129,67	3226,47	2809,00	3142,15	3555,74	3464,15	3158,63	2934,82	3177,58	246,75
	Resistència a tensió màxima (MPa)	21,67	21,72	20,52	21,77	24,57	25,38	22,77	20,78	22,40	1,74
	Deformació a tensió màxima (%)	1,01	1,08	1,27	1,04	1,03	1,05	1,08	1,12	1,08	0,08
	Resistència a la ruptura (N)	255,51	261,58	239,36	255,09	41,30	226,05	253,18	40,84	196,62	96,65

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,13	1,22	1,58	1,82	1,51	1,67	1,40	1,40	1,46	0,23
7-170-15-50	Mòdul Young (MPa)	3457,48	3050,85	2666,84	2814,42	2990,88	3113,28	3221,02	2945,01	3032,47	243,09
	Resistència a tensió màxima (MPa)	24,95	22,01	18,58	20,95	22,60	23,44	22,93	22,64	22,26	1,88
	Deformació a tensió màxima (%)	1,06	1,05	1,03	1,08	1,32	1,19	1,32	1,15	1,15	0,12
	Resistència a la ruptura (N)	328,59	185,64	237,72	221,72	295,48	337,84	70,08	267,42	243,06	87,30
	Deformació a la ruptura (%)	1,18	1,41	1,08	1,58	1,97	1,74	1,58	1,28	1,48	0,30
8-170-15-75	Mòdul Young (MPa)	2937,66	2977,01	3187,28	3579,65	3445,67	3332,47	3344,24	3149,34	3244,16	223,13
	Resistència a tensió màxima (MPa)	21,84	23,29	21,06	25,99	25,60	24,00	23,62	18,86	23,03	2,37
	Deformació a tensió màxima (%)	0,99	1,19	0,86	1,03	1,08	1,10	1,10	0,76	1,01	0,14
	Resistència a la ruptura (N)	28,47	35,62	258,56	214,48	308,16	66,57	305,30	129,82	168,37	118,08
	Deformació a la ruptura (%)	1,23	1,64	0,90	1,42	1,36	1,44	1,27	0,91	1,27	0,26
9-170-15-100	Mòdul Young (MPa)	2644,00	3034,99	3294,60	3302,27	3053,52	3138,83	3195,15		3094,77	224,90
	Resistència a tensió màxima (MPa)	20,34	22,18	22,82	22,66	20,88	22,45	22,90		22,03	1,01
	Deformació a tensió màxima (%)	1,04	0,97	0,88	0,96	0,97	1,06	1,08		1,00	0,07
9-170-15-100	Resistència a la ruptura (N)	34,49	260,63	252,29	216,65	226,16	272,74	268,69		218,81	83,96

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,27	1,21	1,08	1,32	1,18	1,38	1,22		1,24	0,10
10-180-5-50	Mòdul Young (MPa)	3485,12	3284,65	3068,85	3137,57	3329,01	3370,34	3309,37	2907,32	3236,53	186,00
	Resistència a tensió màxima (MPa)	24,96	25,38	23,73	24,37	25,53	25,05	25,11	21,73	24,48	1,26
	Deformació a tensió màxima (%)	1,22	1,21	1,37	1,21	1,27	1,13	1,18	1,26	1,23	0,07
	Resistència a la ruptura (N)	166,50	249,56	309,19	300,48	141,79	24,83	297,90	150,32	205,07	101,08
	Deformació a la ruptura (%)	1,82	1,72	1,60	1,70	1,87	1,88	2,03	1,65	1,79	0,14
11-180-5-75	Mòdul Young (MPa)	2901,80	3047,16	2959,80	3371,16	3726,11	3190,70	2836,55	2556,08	3073,67	357,61
	Resistència a tensió màxima (MPa)	20,46	21,55	22,47	24,76	26,38	23,86	22,62	19,24	22,67	2,31
	Deformació a tensió màxima (%)	1,14	1,00	1,37	1,14	1,19	1,06	1,31	1,42	1,21	0,15
	Resistència a la ruptura (N)	184,40	38,05	193,39	310,26	34,75	244,19	308,10	247,78	195,12	108,04
	Deformació a la ruptura (%)	1,40	1,26	1,88	2,03	1,68	1,95	1,69	2,12	1,75	0,30
12-180-5-100	Mòdul Young (MPa)	3148,67	3142,88	3625,90	3847,31	3580,03	3720,42	3683,80	3424,33	3521,67	261,37
	Resistència a tensió màxima (MPa)	21,20	22,90	25,64	25,78	25,38	25,62	25,57	27,18	24,91	1,90
	Deformació a tensió màxima (%)	0,97	1,14	1,13	1,05	1,09	1,08	1,08	1,23	1,10	0,07
	Resistència a la ruptura (N)	255,94	245,73	248,24	312,63	201,88	89,45	330,74	343,42	253,51	82,13

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,06	1,91	1,83	1,45	1,44	1,54	1,19	2,01	1,55	0,34
13-180-10-50	Mòdul Young (MPa)	3370,34	3274,81	3359,70	3214,33	2971,58	2867,62			3176,40	209,59
	Resistència a tensió màxima (MPa)	23,42	24,05	24,63	24,81	22,15	21,94			23,50	1,23
	Deformació a tensió màxima (%)	0,99	1,08	1,19	1,22	1,09	1,06			1,10	0,09
	Resistència a la ruptura (N)	32,76	311,14	218,80	334,73	266,25	313,61			246,22	112,52
	Deformació a la ruptura (%)	1,09	1,67	1,74	1,88	1,33	1,15			1,48	0,33
14-180-10-75	Mòdul Young (MPa)	3317,94	3192,47	2804,44	3399,24	3285,95	3374,72	2755,90	2743,55	3109,28	289,77
14-180-10-75	Resistència a tensió màxima (MPa)	25,90	25,08	20,73	27,44	24,77	26,74	22,74	22,49	24,49	2,31
	Deformació a tensió màxima (%)	1,08	1,08	1,10	1,09	1,04	1,06	1,01	1,08	1,07	0,03
	Resistència a la ruptura (N)	235,44	345,84	27,65	409,05	47,25	423,38	28,09	284,67	225,17	169,38
	Deformació a la ruptura (%)	1,19	1,54	1,31	1,38	1,10	1,18	1,06	1,15	1,24	0,16
15-180-10-100	Mòdul Young (MPa)	2949,29	3167,90	2970,34	3152,17	3240,32	3183,92	2758,91	2758,80	3022,70	192,19
	Resistència a tensió màxima (MPa)	22,46	26,45	24,47	24,19	23,46	22,71	21,73	21,13	23,33	1,70
	Deformació a tensió màxima (%)	1,06	1,37	1,10	1,12	1,03	1,05	1,10	1,14	1,12	0,11
	Resistència a la ruptura (N)	269,37	405,93	351,19	72,07	175,68	39,04	390,68	329,63	254,20	142,73

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,10	1,74	1,26	1,17	1,22	1,10	1,26	1,31	1,27	0,21
16-180-15-50	Mòdul Young (MPa)	3198,44	3359,71	2976,54	3209,82	3300,78	3387,95	3235,99	2932,99	3200,28	166,31
	Resistència a tensió màxima (MPa)	25,96	25,36	23,27	23,46	24,48	27,34	24,14	23,53	24,69	1,43
	Deformació a tensió màxima (%)	1,21	1,04	1,14	1,04	1,14	1,19	1,05	1,15	1,12	0,07
	Resistència a la ruptura (N)	163,07	24,63	293,57	314,39	24,97	370,97	78,59	294,91	195,64	140,11
	Deformació a la ruptura (%)	1,45	1,12	1,60	1,05	1,37	1,35	1,09	1,28	1,29	0,19
17-180-15-75	Mòdul Young (MPa)	3255,45	3426,06	2874,44	3829,40	3330,32	3398,37	3306,39	2956,39	3297,10	294,69
	Resistència a tensió màxima (MPa)	22,06	26,19	21,72	28,34	24,28	25,32	25,03	21,98	24,36	2,35
	Deformació a tensió màxima (%)	0,95	1,18	1,14	1,14	1,10	1,09	1,14	1,10	1,11	0,07
	Resistència a la ruptura (N)	292,68	167,68	243,72	67,81	74,54	176,79	30,64	310,38	170,53	106,38
	Deformació a la ruptura (%)	0,96	1,27	1,31	1,21	1,18	1,27	1,28	1,18	1,21	0,11
18-180-15-100	Mòdul Young (MPa)	3123,33	3005,23	2827,51	3127,03	2874,12	3149,52	2556,59		2951,90	215,93
	Resistència a tensió màxima (MPa)	24,56	23,55	21,62	23,72	22,05	24,99	20,84		23,05	1,56
	Deformació a tensió màxima (%)	1,15	1,15	1,19	1,14	1,19	1,17	1,24		1,18	0,03
	Resistència a la ruptura (N)	324,53	77,88	306,01	354,19	142,56	336,71	120,42		237,47	118,27

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
18-180-15-100	Deformació a la ruptura (%)	1,38	1,21	1,38	1,32	1,31	1,50	1,46		1,37	0,10
19-190-5-50	Mòdul Young (MPa)	3575,90	3288,68	2727,11	3053,55	3330,54	3904,29	3388,67		3324,11	373,07
	Resistència a tensió màxima (MPa)	28,70	24,88	21,56	24,82	26,15	31,03	27,81		26,42	3,08
	Deformació a tensió màxima (%)	1,27	1,21	1,05	1,31	1,33	1,33	1,32		1,26	0,10
	Resistència a la ruptura (N)	378,03	362,70	302,40	343,41	301,17	411,82	404,07		357,66	44,68
	Deformació a la ruptura (%)	1,59	1,81	1,12	1,76	2,36	2,12	1,60		1,76	0,40
20-190-5-75	Mòdul Young (MPa)	3121,74	3407,89	3129,09	3191,64	3260,60	3331,52	3339,41	3108,04	3236,24	115,14
	Resistència a tensió màxima (MPa)	25,61	26,55	25,06	27,50	26,98	27,62	28,20	26,77	26,79	1,05
	Deformació a tensió màxima (%)	1,18	1,12	1,08	1,35	1,31	1,29	1,12	1,31	1,22	0,11
	Resistència a la ruptura (N)	120,61	404,78	319,30	425,40	422,35	146,19	48,37	92,55	247,44	161,31
	Deformació a la ruptura (%)	1,33	1,28	1,18	1,99	1,82	1,78	1,32	1,56	1,53	0,30
21-190-5-100	Mòdul Young (MPa)	3245,05	3511,04	3111,94	3659,21	3458,88	3355,79	3323,00	2933,95	3324,86	229,87
	Resistència a tensió màxima (MPa)	24,03	26,67	23,69	28,60	26,09	24,72	26,91	21,18	25,24	2,31
	Deformació a tensió màxima (%)	0,96	1,03	1,06	1,08	1,14	1,10	1,22	1,10	1,09	0,08
	Resistència a la ruptura (N)	276,52	138,00	265,95	136,96	229,25	339,08	49,18	67,08	187,75	105,18

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,08	1,28	1,15	1,32	1,36	1,14	1,80	1,14	1,28	0,23
22-190-10-50	Mòdul Young (MPa)	3265,53	3262,68	3429,48	3351,04	3330,10	3367,00	3086,05	3253,15	3293,13	103,47
	Resistència a tensió màxima (MPa)	24,22	27,39	26,86	26,14	26,83	24,38	23,25	26,18	25,65	1,50
	Deformació a tensió màxima (%)	1,08	1,19	1,06	1,24	1,09	1,13	1,13	1,24	1,15	0,07
	Resistència a la ruptura (N)	32,22	340,81	329,69	71,00	356,54	236,06	232,29	129,45	216,01	126,05
	Deformació a la ruptura (%)	1,17	1,76	1,28	1,41	1,29	1,36	1,18	1,39	1,35	0,19
23-190-10-75	Mòdul Young (MPa)	3041,72	3125,36	2802,40	3195,24	3211,98	3042,15	3076,54	3129,78	3078,15	128,27
	Resistència a tensió màxima (MPa)	24,31	24,82	20,92	24,52	25,81	22,48	24,05	24,37	23,91	1,52
23-190-10-75	Deformació a tensió màxima (%)	1,10	1,05	1,08	1,08	1,09	1,03	1,09	1,00	1,06	0,04
	Resistència a la ruptura (N)	356,15	373,44	292,48	347,98	403,82	363,51	336,01	36,93	313,79	116,31
	Deformació a la ruptura (%)	1,15	1,09	1,22	1,21	1,21	1,05	1,22	1,03	1,15	0,08
24-190-10-100	Mòdul Young (MPa)	2828,65	2920,38	3012,22	3432,81	3010,41				3040,90	231,79
	Resistència a tensió màxima (MPa)	22,73	21,03	22,99	26,61	22,85				23,24	2,04
	Deformació a tensió màxima (%)	1,05	0,96	1,00	1,06	1,06				1,03	0,05
	Resistència a la ruptura (N)	41,92	93,01	337,24	345,61	333,84				230,32	149,82

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,09	1,01	1,03	1,09	1,19				1,08	0,07
25-190-15-50	Mòdul Young (MPa)	3233,62	3374,44	3261,26	3314,95	3180,43				3272,94	74,68
	Resistència a tensió màxima (MPa)	18,42	19,02	19,93	19,72	20,08				19,44	0,70
	Deformació a tensió màxima (%)	0,60	0,60	0,65	0,68	0,68				0,64	0,04
	Resistència a la ruptura (N)	245,82	158,40	184,17	285,71	44,72				183,76	92,50
	Deformació a la ruptura (%)	0,62	0,62	0,67	0,68	0,69				0,65	0,04
26-190-15-75	Mòdul Young (MPa)	3135,18	3161,96	3178,49	3158,30	3103,14				3147,41	29,18
	Resistència a tensió màxima (MPa)	20,48	16,60	19,30	22,70	21,09				20,04	2,28
	Deformació a tensió màxima (%)	0,79	0,60	0,64	0,85	0,74				0,73	0,10
	Resistència a la ruptura (N)	286,77	251,17	78,98	131,68	168,18				183,36	85,27
	Deformació a la ruptura (%)	0,79	0,62	0,65	0,86	0,76				0,74	0,10
27-190-15-100	Mòdul Young (MPa)	3096,04	3203,08							3149,56	75,69
	Resistència a tensió màxima (MPa)	16,22	12,89							14,55	2,36
	Deformació a tensió màxima (%)	0,64	0,45							0,54	0,14
	Resistència a la ruptura (N)	242,46	43,88							143,17	140,41

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	0,64	0,46							0,55	0,13
28-170-5-50	Mòdul Young (MPa)	3214,58	3139,32	3243,52	3259,14	3401,33				3251,58	95,55
	Resistència a tensió màxima (MPa)	45,53	53,79	47,91	51,23	53,25				50,34	3,54
	Deformació a tensió màxima (%)	1,65	2,01	1,86	1,82	1,83				1,84	0,13
	Resistència a la ruptura (N)	618,72	233,64	769,41	805,39	811,17				647,67	244,28
	Deformació a la ruptura (%)	1,67	2,09	1,86	1,88	1,91				1,88	0,15
29-180-5-50	Mòdul Young (MPa)	3015,37	2773,37	2491,56	2792,67	2580,29	3094,89	3061,75	2782,25	2824,02	220,95
	Resistència a tensió màxima (MPa)	38,37	32,79	33,03	36,88	36,82	37,14	35,14	34,27	35,55	2,06
	Deformació a tensió màxima (%)	1,82	1,59	1,85	1,76	1,68	1,49	1,50	1,71	1,67	0,14
	Resistència a la ruptura (N)	431,51	510,74	518,48	587,27	580,36	518,57	45,70	528,63	465,16	176,09
	Deformació a la ruptura (%)	2,17	1,85	2,36	1,92	1,69	1,50	1,55	1,81	1,86	0,29
30-180-5-50	Mòdul Young (MPa)	3156,31	2885,60	2927,80	3073,85	3287,47	3152,74	2801,31		3040,73	174,18
	Resistència a tensió màxima (MPa)	33,81	31,89	29,52	30,88	33,43	32,44	29,10		31,58	1,83
	Deformació a tensió màxima (%)	1,65	1,56	1,42	1,40	1,50	1,50	1,59		1,52	0,09
	Resistència a la ruptura (N)	133,26	475,55	163,08	492,82	396,92	143,21	352,57		308,20	158,54

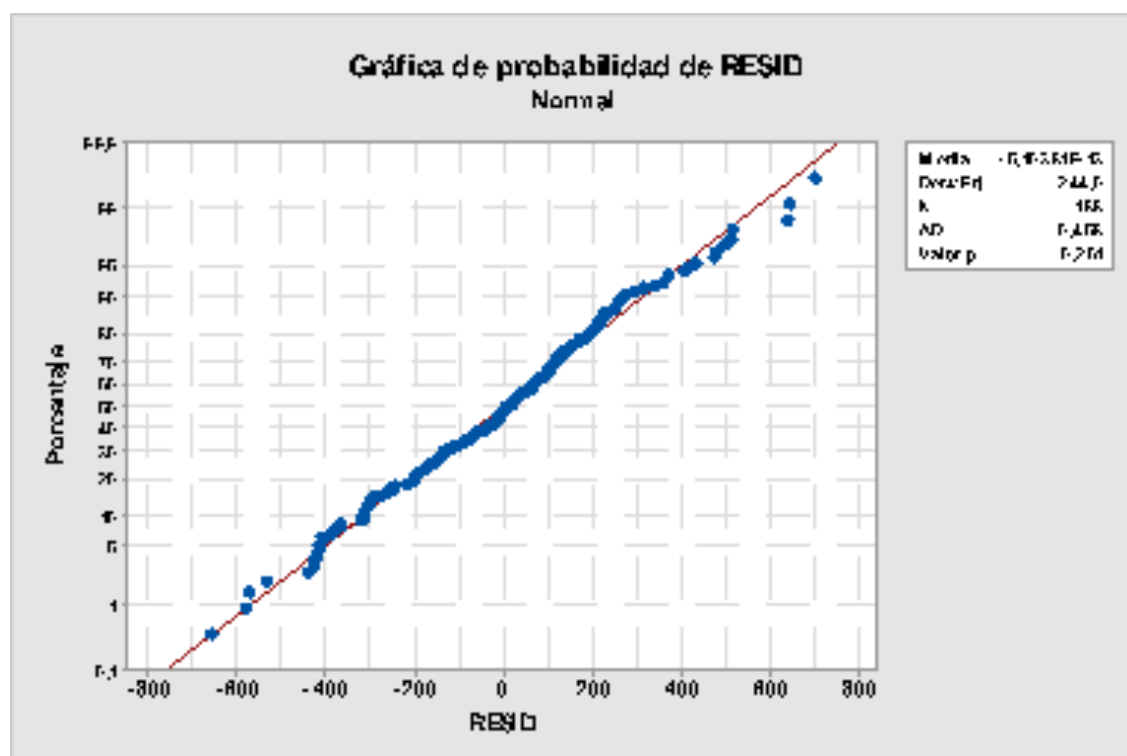
Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,96	1,79	1,63	1,42	1,72	1,62	1,97		1,73	0,20
31-180-5-50	Mòdul Young (MPa)	3083,88	2803,15	3261,93	3327,28	3185,94	3167,7			3138,31	184,07423
	Resistència a tensió màxima (MPa)	26,60158	24,29475	28,58387	28,30076	28,15169	29,00384			27,4894 2	1,76536
	Deformació a tensió màxima (%)	1,41	1,47	1,36	1,24	1,29	1,33			1,35	0,08229
	Resistència a la ruptura (N)	155,88	319,66	45,44	238	350,28	377,97			247,87	128,14521
	Deformació a la ruptura (%)	2,38523	1,91028	1,7313	2,29535	1,74394	1,52573			1,93197	0,34018
32-180-5-50	Mòdul Young (MPa)	2896,64	3161,41	2859,15	3225,65	3124,36	2984,62	2797,97		3007,11	165,15
	Resistència a tensió màxima (MPa)	22,01	24,61	22,79	22,96	23,22	23,06	20,81		22,78	1,16
	Deformació a tensió màxima (%)	1,14	1,36	1,23	1,14	1,23	1,37	1,27		1,25	0,09
32-180-5-50	Resistència a la ruptura (N)	40,23	332,39	138,59	307,31	330,60	345,21	98,76		227,58	130,00
	Deformació a la ruptura (%)	1,41	2,09	1,58	1,51	2,60	1,68	1,68		1,79	0,42
33-180-5-50	Mòdul Young (MPa)	3338,62	2904,35	3129,48	3268,56	3184,64	3193,79	3059,93		3154,19	142,31
	Resistència a tensió màxima (MPa)	22,31	19,50	21,60	21,12	21,56	21,58	19,08		20,96	1,20
	Deformació a tensió màxima (%)	1,14	1,49	1,36	0,97	1,36	1,24	1,31		1,27	0,17
	Resistència a la ruptura (N)	295,55	278,51	313,00	327,06	236,44	26,97	241,10		245,52	102,19

Mostra	Propietat	Replicats								Mitjana	Desviació estandard
		1	2	3	4	5	6	7	8		
	Deformació a la ruptura (%)	1,37	1,92	2,23	1,06	1,73	1,78	1,45		1,65	0,39

Annex C: Resultats anàlisi estadístic

S'ha fet test d'anàlisi de variància (ANOVA) amb un nivell de significació d'un 95% de les dades de caracterització (mòdul de Young i resistència a tensió màxima) amb el programa Minitab, versió 18.1 amb els següents resultats:

Mòdul de Young:

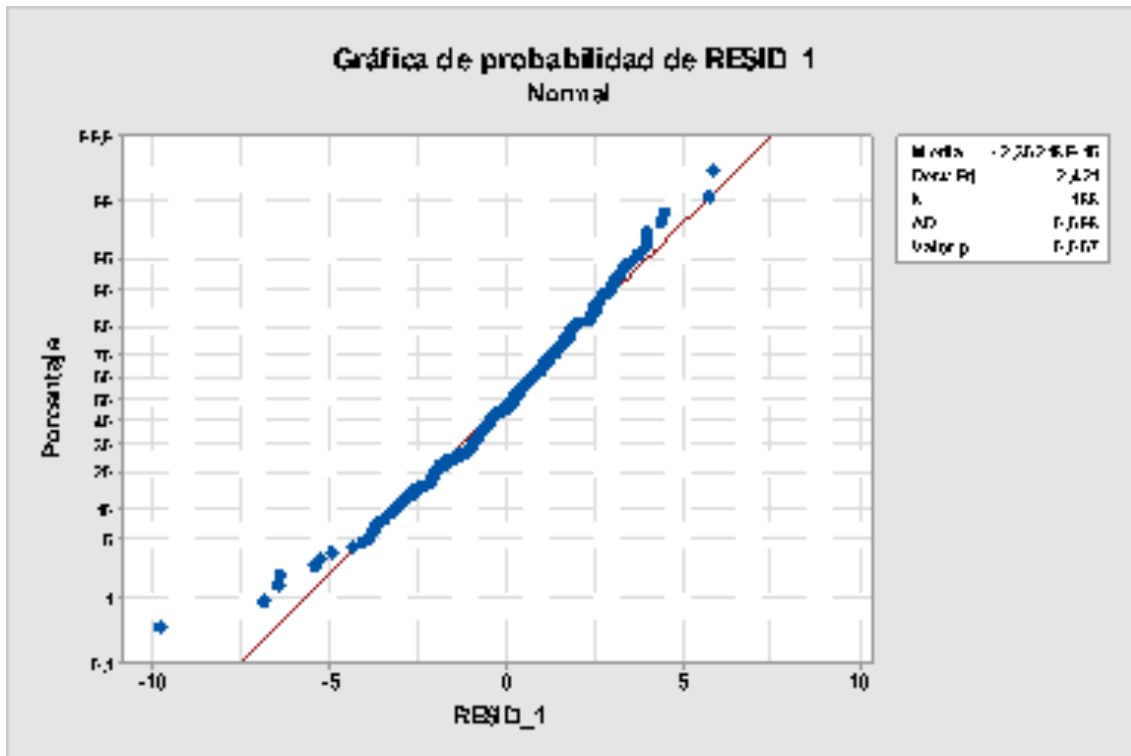


RESID és Mòdul de Young

Model lineal general: Mòdul de Young vs Temperatura, temps i rpm

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	1	237128	237128	3,92	0,049
Temps	1	198555	198555	3,28	0,072
Rpm	1	1255	1255	0,02	0,886

Resistència a tensió màxima:



RESID_1 és Resistència a tensió màxima

Model lineal general: Resistència a tensió màxima vs Temperatura, temps i rpm

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	1	26,54	26,540	4,46	0,036
Temps	1	117,43	117,430	19,71	0,000
Rpm	1	13,95	13,947	2,34	0,128

Annex D: Resultats d'absorció d'aigua

Es presenten els resultats obtinguts al laboratori per totes les mesures fetes per calcular l'absorció d'aigua segons l'Equació 3-4:

Codi	W	W ₀	WA (%)	Mitjana WA (%)	Desviació estandard (s)
1-170-5-50	0,764	0,783	2,49	2,490	0,005
	0,888	0,906	2,03		
	0,802	0,822	2,49		
2-170-5-75	0,795	0,812	2,14	2,188	0,070
	0,766	0,782	2,09		
	0,849	0,868	2,24		
3-170-5-100	0,837	0,853	1,91	1,904	0,010
	0,896	0,913	1,9		
	0,833	0,846	1,56		
4-170-10-50	0,816	0,83	1,72	1,930	0,303
	0,793	0,81	2,14		
	0,654	0,672	2,75		
5-170-10-75	0,892	0,913	2,35	2,192	0,229
	0,936	0,955	2,03		
	0,958	0,975	1,77		
6-170-10-100	0,839	0,864	2,98	1,797	0,427
	0,81	0,827	2,1		
	0,87	0,883	1,49		
7-170-15-50	0,923	0,943	2,17	1,241	0,189
	0,903	0,913	1,11		
	0,8	0,811	1,38		
8-170-15-75	0,778	0,78	0,26	0,374	0,339

Codi	W	W ₀	WA (%)	Mitjana WA (%)	Desviació estandard (s)
	0,926	0,933	0,76		
	0,912	0,913	0,11		
9-170-15-100	0,844	0,845	0,12	1,141	0,283
	0,744	0,751	0,94		
	0,895	0,907	1,34		
10-180-5-50	0,925	0,943	1,95	1,972	0,037
	0,901	0,919	2		
	0,796	0,805	1,13		
11-180-5-75	0,945	0,961	1,69	1,731	0,064
	0,826	0,84	1,69		
	0,942	0,959	1,8		
12-180-5-100	0,77	0,787	2,21	1,833	0,363
	0,809	0,821	1,48		
	0,996	1,014	1,81		
13-180-10-50	0,913	0,95	4,05	3,739	0,443
	0,934	0,966	3,43		
	1,028	1,041	1,26		
14-180-10-75	0,786	0,805	2,42	2,339	0,117
	0,835	0,855	2,4		
	0,862	0,881	2,2		
15-180-10-100	0,921	0,939	1,95	1,910	0,047
	0,86	0,876	1,86		
	0,887	0,904	1,92		
16-180-15-50	0,734	0,748	1,91	2,020	0,159
	0,849	0,871	2,59		
	0,844	0,862	2,13		

Codi	W	W ₀	WA (%)	Mitjana WA (%)	Desviació estandard (s)
17-180-15-75	0,967	0,983	1,65	1,538	0,165
	0,985	0,999	1,42		
	0,773	0,793	2,59		
18-180-15-100	0,919	0,93	1,2	1,557	0,046
	0,853	0,866	1,52		
	0,818	0,831	1,59		
19-190-5-50	0,891	0,904	1,46	1,476	0,024
	0,938	0,952	1,49		
	0,99	1,006	1,62		
20-190-5-75	1,171	1,19	1,62	1,679	0,080
	0,924	0,944	2,16		
	0,922	0,938	1,74		
21-190-5-100	0,764	0,777	1,7	1,698	0,005
	0,885	0,9	1,69		
	0,77	0,785	1,95		
22-190-10-50	0,809	0,818	1,11	2,318	0,508
	0,919	0,937	1,96		
	0,859	0,882	2,68		
23-190-10-75	0,838	0,845	0,84	1,980	0,045
	0,821	0,837	1,95		
	0,845	0,862	2,01		
24-190-10-100	0,746	0,757	1,47	1,563	0,125
	0,947	0,955	0,84		
	0,787	0,8	1,65		
25-190-15-50	0,793	0,815	2,77	1,811	0,145
	0,761	0,774	1,71		

Codi	W	W ₀	WA (%)	Mitjana WA (%)	Desviació estandard (s)
	0,784	0,799	1,91		
26-190-15-75	0,778	0,792	1,8	1,846	0,074
	0,984	1,003	1,93		
	0,83	0,845	1,81		
27-190-15-100	0,503	0,52	3,38	1,833	0,034
	0,774	0,788	1,81		
	0,808	0,823	1,86		
28-170-5-50	0,88	0,892	1,36	0,422	0,121
	0,839	0,85	1,31		
	0,863	0,877	1,62		
29-180-5-50	0,785	0,797	1,53	1,35	0,30
	0,789	0,801	1,52		
	0,8	0,808	1,00		
30-180-5-50	0,816	0,827	1,35	1,26	0,07
	0,906	0,917	1,21		
	0,895	0,906	1,23		
31-180-5-50	0,901	0,913	1,33	1,56	0,33
	0,837	0,852	1,79		
	0,834	0,855	2,52		
32-180-5-50	0,925	0,943	1,95	1,97	0,04
	0,901	0,919	2		
	0,796	0,805	1,13		
33-180-5-50	0,725	0,739	1,93	2,02	0,15
	0,826	0,842	1,94		
	0,729	0,745	2,19		

Annex E: Resultats de densitat

Per fer els càlculs de la densitat s'han pesat en primer lloc el picnòmetre buit (P), després la mostra (M), posteriorment el picnòmetre ple amb isopropanol (P+I) i finalment s'ha pesat el picnòmetre ple amb la mostra i isopropanol (P+M+I). A partir d'aquestes dades es pot calcular la massa d'isopropanol desallotjat per la mostra $[(P+I)-P]-((P+M+I)-(P+M))$. A partir d'aquesta massa i la densitat de l'isopropanol (0,787 g/cm³) es pot calcular el volum desallotjat que correspon al volum de la mostra. La densitat de la mostra correspon a la massa de la mostra (M) dividida pel seu volum.

Codi	P (g)	P + M (g)	P+M+I (g)	P+I (g)	M mostra	M dessallotjada	ρ mostra (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	S
1-170-5-50	18,842	18,969	40,33	40,285	0,127	0,082	1,22	1,10	0,10
	18,842	18,978	40,348	40,314	0,136	0,102	1,05		
	18,842	18,975	40,349	40,316	0,133	0,1	1,05		
2-170-5-75	18,844	18,987	40,357	40,305	0,143	0,091	1,24	1,20	0,05
	18,844	18,959	40,35	40,309	0,115	0,074	1,22		
	18,845	18,994	40,347	40,3	0,149	0,102	1,15		
3-170-5-100	18,844	19,005	40,35	40,297	0,161	0,108	1,17	1,17	0,12
	18,842	18,928	40,334	40,313	0,086	0,065	1,04		
	18,842	18,932	40,336	40,301	0,09	0,055	1,29		
4-170-10-50	18,843	18,931	40,332	40,315	0,088	0,071	0,98	1,01	0,20

Codi	P (g)	P + M (g)	P+M+I (g)	P+I (g)	M mostra	M dessallotjada	ρ mostra (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	S
	18,843	18,91	40,304	40,3	0,067	0,063	0,84		
	18,843	18,907	40,314	40,291	0,064	0,041	1,23		
5-170-10-75	18,845	18,938	40,318	40,311	0,093	0,086	0,85	0,92	0,07
	18,84	18,921	40,318	40,306	0,081	0,069	0,92		
	18,843	18,953	40,321	40,299	0,11	0,088	0,98		
6-170-10-100	18,843	18,915	40,32	40,31	0,072	0,062	0,91	1,17	0,30
	18,843	18,919	40,323	40,301	0,076	0,054	1,11		
	18,841	18,923	40,328	40,289	0,082	0,043	1,50		
7-170-15-50	18,842	18,908	40,334	40,316	0,066	0,048	1,08	1,15	0,09
	18,845	18,899	40,318	40,302	0,054	0,038	1,12		
	18,842	18,91	40,328	40,303	0,068	0,043	1,24		
8-170-15-75	18,844	18,915	40,338	40,321	0,071	0,054	1,03	0,97	0,12
	18,843	18,911	40,32	40,303	0,068	0,051	1,05		
	18,842	19,652	40,342	40,296	0,81	0,764	0,83		
9-170-15-100	18,842	18,922	40,323	40,308	0,08	0,065	0,97	1,08	0,12
	18,841	18,908	40,324	40,301	0,067	0,044	1,20		

Codi	P (g)	P + M (g)	P+M+I (g)	P+I (g)	M mostra	M dessallotjada	ρ mostra (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	S
	18,842	18,959	40,335	40,305	0,117	0,087	1,06		
10-180-5-50	18,84	18,937	40,334	40,306	0,097	0,069	1,11	1,12	0,02
	18,842	18,929	40,342	40,315	0,087	0,06	1,14		
	18,843	18,951	40,34	40,308	0,108	0,076	1,12		
11-180-5-75	18,844	18,907	40,334	40,302	0,063	0,031	1,60	1,25	0,33
	18,843	18,908	40,325	40,314	0,065	0,054	0,95		
	18,842	18,927	40,315	40,286	0,085	0,056	1,19		
12-180-5-100	18,845	18,972	40,35	40,306	0,127	0,083	1,20	1,16	0,12
	18,842	18,964	40,337	40,292	0,122	0,077	1,25		
	18,84	18,911	40,319	40,303	0,071	0,055	1,02		
13-180-10-50	18,84	18,927	40,346	40,304	0,087	0,045	1,52	1,28	0,23
	18,844	18,93	40,336	40,305	0,086	0,055	1,23		
	18,844	18,933	40,326	40,302	0,089	0,065	1,08		
14-180-10-75	18,843	18,924	40,324	40,311	0,081	0,068	0,94	1,06	0,11
	18,842	18,942	40,33	40,3	0,1	0,07	1,12		
	18,845	18,909	40,318	40,299	0,064	0,045	1,12		

Codi	P (g)	P + M (g)	P+M+I (g)	P+I (g)	M mostra	M dessallotjada	ρ mostra (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	S
15-180-10-100	18,844	18,929	40,329	40,307	0,085	0,063	1,06	1,05	0,04
	18,846	18,948	40,34	40,312	0,102	0,074	1,08		
	18,842	18,902	40,332	40,319	0,06	0,047	1,00		
16-180-15-50	18,842	18,929	40,329	40,302	0,087	0,06	1,14	1,17	0,07
	18,842	18,946	40,351	40,32	0,104	0,073	1,12		
	18,84	18,926	40,339	40,307	0,086	0,054	1,25		
17-180-15-75	18,842	18,915	40,334	40,317	0,073	0,056	1,03	1,09	0,13
	18,842	18,921	40,334	40,305	0,079	0,05	1,24		
	18,842	18,899	40,315	40,303	0,057	0,045	1,00		
18-180-15-100	18,84	18,912	40,337	40,32	0,072	0,055	1,03	1,07	0,07
	18,845	18,93	40,32	40,3	0,085	0,065	1,03		
	18,841	18,924	40,331	40,305	0,083	0,057	1,15		
19-190-5-50	18,841	18,935	40,333	40,3	0,094	0,061	1,21	1,08	0,13
	18,842	18,923	40,327	40,313	0,081	0,067	0,95		
	18,841	18,918	40,334	40,313	0,077	0,056	1,08		
20-190-5-75	18,842	18,945	40,326	40,302	0,103	0,079	1,03	1,29	0,27

Codi	P (g)	P + M (g)	P+M+I (g)	P+I (g)	M mostra	M dessallotjada	ρ mostra (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	S
	18,843	18,938	40,354	40,307	0,095	0,048	1,56		
	18,843	18,938	40,34	40,303	0,095	0,058	1,29		
21-190-5-100	18,842	18,963	40,349	40,305	0,121	0,077	1,24	1,17	0,10
	18,842	18,978	40,339	40,29	0,136	0,087	1,23		
	18,843	18,969	40,345	40,313	0,126	0,094	1,05		
22-190-10-50	18,843	18,973	40,335	40,303	0,13	0,098	1,04	1,20	0,18
	18,844	18,973	40,347	40,291	0,129	0,073	1,39		
	18,841	18,958	40,348	40,311	0,117	0,08	1,15		
23-190-10-75	18,84	18,926	40,323	40,312	0,086	0,075	0,90	1,03	0,12
	18,842	18,922	40,32	40,3	0,08	0,06	1,05		
	18,84	18,914	40,316	40,293	0,074	0,051	1,14		
24-190-10-100	18,842	18,942	40,309	40,288	0,1	0,079	1,00	0,98	0,21
	18,843	18,901	40,299	40,301	0,058	0,06	0,76		
	18,846	18,932	40,332	40,303	0,086	0,057	1,19		
25-190-15-50	18,846	18,921	40,312	40,298	0,075	0,061	0,97	1,04	0,10
	18,845	18,906	40,316	40,303	0,061	0,048	1,00		

Codi	P (g)	P + M (g)	P+M+I (g)	P+I (g)	M mostra	M dessallotjada	ρ mostra (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	S
	18,844	18,906	40,305	40,285	0,062	0,042	1,16		
26-190-15-75	18,844	18,932	40,338	40,304	0,088	0,054	1,28	1,24	0,15
	18,842	18,93	40,329	40,306	0,088	0,065	1,07		
	18,842	18,925	40,317	40,282	0,083	0,048	1,36		
27-190-15-100	18,842	18,906	40,303	40,29	0,064	0,051	0,99	1,12	0,13
	18,839	18,917	40,312	40,288	0,078	0,054	1,14		
	18,845	18,918	40,322	40,295	0,073	0,046	1,25		
28-170-5-50	18,842	18,919	40,317	40,289	0,077	0,049	1,24	1,19	0,11
	18,842	18,921	40,32	40,299	0,079	0,058	1,07		
	18,84	18,921	40,332	40,301	0,081	0,05	1,27		
29-180-5-50	18,839	18,915	40,355	40,327	0,076	0,048	1,25	1,21	0,10
	18,839	18,909	40,365	40,345	0,07	0,05	1,10		
	18,839	18,906	40,356	40,33	0,067	0,041	1,29		
30-180-5-50	18,839	18,91	40,356	40,329	0,071	0,044	1,27	1,26	0,04
	18,842	18,911	40,365	40,338	0,069	0,042	1,29		
	18,838	18,901	40,353	40,331	0,063	0,041	1,21		

Codi	P (g)	P + M (g)	P+M+I (g)	P+I (g)	M mostra	M dessallotjada	ρ mostra (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	S
31-180-5-50	18,842	18,916	40,375	40,345	0,074	0,044	1,32	1,30	0,12
	18,842	18,906	40,369	40,348	0,064	0,043	1,17		
	18,839	18,909	40,365	40,334	0,07	0,039	1,41		
32-180-5-50	18,841	18,903	40,357	40,348	0,062	0,053	0,92	1,11	0,17
	18,842	18,909	40,349	40,328	0,067	0,046	1,15		
	18,84	18,904	40,346	40,322	0,064	0,04	1,26		
33-180-5-50	18,842	18,915	40,351	40,321	0,073	0,043	1,34	1,18	0,13
	18,843	18,908	40,343	40,325	0,065	0,047	1,09		
	18,84	18,91	40,338	40,317	0,07	0,049	1,12		

Annex F: Dades de consum energètic de la mescladora

Les mesures energètiques es van fer de forma experimental connectant un analitzador de corrent a la mescladora mentre es fabricaven les plaques. A partir dels resultats obtinguts, que es mostren a la taula, es pot veure que el consum és similar per totes les plaques i que inclou el consum per escalfar la màquina (0,02 kWh) i per mantenir-ne la temperatura durant els 5 min de mescla (0,022 kWh). Com que cal fer dues mescles per placa, el consum de la mescladora per cada placa és de 0,084kWh.

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
14:39		78968,18	0	0
14:41		78968,18	3,39	0
14:43		78968,28	3,39	0,1
14:45		78968,33	1,15	0,05
14:47		78968,36	0	0,03
14:49		78968,38	1,16	0,02
14:51		78968,39	0	0,01
14:53		78968,4	0	0,01
14:55	80-50-180-1	78968,42	0	0,02
14:57	80-50-180-1	78968,43	0	0,01
14:59	80-50-180-1	78968,44	0	0,01
15:01		78968,45	0	0,01
15:03		78968,46	0	0,01
15:05		78968,47	0,71	0,01
15:07		78968,49	0	0,02
15:09		78968,5	1,44	0,01
15:11	80-50-180-1b	78968,51	1,96	0,01
15:13	80-50-180-1b	78968,52	0	0,01
15:15	80-50-180-1b	78968,53	0	0,01

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
15:17		78968,54	0	0,01
15:19		78968,55	1,83	0,01
15:21		78968,57	0,45	0,02
15:23	80-50-180-1	78968,58	0	0,01
15:25	80-50-180-1	78968,59	0	0,01
15:27	80-50-180-1	78968,6	0	0,01
15:29	80-50-180-1	78968,61	0	0,01
15:31		78968,62	0	0,01
15:33		78968,63	1,14	0,01
15:35		78968,65	0	0,02
15:37		78968,65	0	0
15:39		78968,67	0	0,02
15:41		78968,68	0	0,01
15:43	90-50-180-1	78968,69	1,17	0,01
15:45	90-50-180-1	78968,7	0	0,01
15:47	90-50-180-1	78968,71	0	0,01
15:49		78968,72	1,25	0,01
15:51		78968,73	2,09	0,01
15:53	90-50-180-1b	78968,74	0,58	0,01
15:55	90-50-180-1b	78968,76	0	0,02
15:57	90-50-180-1b	78968,76	0	0
15:59		78968,78	0	0,02
16:01		78968,79	0,43	0,01
16:03		78968,8	0,43	0,01
16:05		78968,81	0,46	0,01
16:07	90-50-180-2	78968,82	0,96	0,01
16:09	90-50-180-2	78968,83	0	0,01

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
16:11	90-50-180-2	78968,84	0	0,01
16:13		78968,85	0	0,01
16:15		78968,87	0	0,02
16:17		78968,88	0	0,01
16:19	90-50-180-2b	78968,89	0	0,01
16:21	90-50-180-2b	78968,9	0	0,01
16:23		78968,91	0	0,01
16:25		78968,92	0	0,01
16:27		78968,95	0	0,03
16:29		78968,95	0	0
16:31	65-50-180-1	78968,96	0,9	0,01
16:33	65-50-180-1	78968,97	1,22	0,01
16:35	65-50-180-1	78968,98	0	0,01
16:37	65-50-180-1	78968,99	1,17	0,01
16:39		78969	0,47	0,01
16:41		78969,01	0	0,01
16:43		78969,03	0	0,02
16:45	65-50-180-1b	78969,04	0	0,01
16:47	65-50-180-1b	78969,05	0,62	0,01
16:49	65-50-180-1b	78969,05	0	0
16:51		78969,07	0	0,02
16:53		78969,08	1,16	0,01
16:55		78969,09	0	0,01
16:57		78969,1	0	0,01
16:59		78969,11	0	0,01
17:01		78969,12	0	0,01
17:03		78969,12	0	0

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
17:05		78969,12	0	0
17:07		78969,12	0	0
17:09		78969,12	0	0
17:11		78969,12	0	0
17:13		78969,12	0	0
17:15		78969,15	1,92	0,03
17:17		78969,17	0,69	0,02
17:19		78969,18	0,7	0,01
17:21		78969,19	0	0,01
17:23		78969,2	0	0,01
17:25	65-50-180-2	78969,21	0,69	0,01
17:27	65-50-180-2	78969,22	0	0,01
17:29	65-50-180-2	78969,23	0	0,01
17:31	65-50-180-2	78969,24	0	0,01
17:33		78969,25	0	0,01
17:35		78969,26	0	0,01
17:37		78969,27	0	0,01
17:39		78969,29	0	0,02
17:41	65-50-180-2b	78969,29	0	0
17:43	65-50-180-2b	78969,3	0	0,01
17:45	65-50-180-2b	78969,31	0,75	0,01
17:47		78969,33	0	0,02
17:49		78969,34	0	0,01
17:51		78969,35	0,4	0,01
17:53		78969,35	0,47	0
17:55		78969,37	1,08	0,02
17:57	80-50-180-2	78969,38	0	0,01

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
17:59	80-50-180-2	78969,39	0,68	0,01
18:01	80-50-180-2	78969,4	0	0,01
18:03	80-50-180-2	78969,41	0	0,01
18:05		78969,42	0	0,01
18:07		78969,43	1,06	0,01
18:09		78969,44	0	0,01
18:11	80-50-180-2b	78969,45	1,11	0,01
18:13	80-50-180-2b	78969,46	0	0,01
18:15	80-50-180-2b	78969,46	0	0
18:17		78969,48	0	0,02
18:19		78969,49	0,94	0,01
18:21		78969,5	0	0,01
18:23	80-100-180-1	78969,51	0	0,01
18:25	80-100-180-1	78969,52	0,78	0,01
18:27	80-100-180-1	78969,53	0	0,01
18:29		78969,54	0	0,01
18:31		78969,55	1,7	0,01
18:33		78969,56	0	0,01
18:35		78969,57	1,38	0,01
18:37		78969,58	0,68	0,01
18:39	80-100-180-1b	78969,59	0	0,01
18:41	80-100-180-1b	78969,6	0	0,01
18:43	80-100-180-1b	78969,61	0	0,01
18:45		78969,62	0,45	0,01
18:47		78969,63	0	0,01
18:49		78969,64	0	0,01
18:51		78969,65	0	0,01

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
18:53		78969,67	0	0,02
18:55		78969,68	0,68	0,01
18:57		78969,68	0	0
Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
9:27		78969,68	3,38	0
9:29		78969,79	3,24	0,11
9:31	80-50-170-1	78969,86	3,28	0,07
9:33	80-50-170-1	78969,89	1,16	0,03
9:35	80-50-170-1	78969,91	0	0,02
9:37		78969,92	0	0,01
9:39		78969,94	1,18	0,02
9:41		78969,95	0	0,01
9:43		78969,96	0	0,01
9:45		78969,97	0	0,01
9:47		78969,99	0	0,02
9:49		78970	0	0,01
9:51	80-50-170-1	78970,01	0	0,01
9:53	80-50-170-1	78970,02	0	0,01
9:55	80-50-170-1	78970,03	0	0,01
9:57		78970,04	0	0,01
9:59		78970,05	1,13	0,01
10:01		78970,06	0	0,01
10:03	80-50-170-1b	78970,07	1,58	0,01
10:05	80-50-170-1b	78970,09	1,13	0,02
10:07	80-50-170-1b	78970,09	0,47	0
10:09		78970,1	0	0,01

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
10:11		78970,11	0	0,01
10:13		78970,13	0	0,02
10:15	80-50-170-2b	78970,14	0,56	0,01
10:17	80-50-170-2b	78970,15	1,03	0,01
10:19	80-50-170-2b	78970,15	0	0
10:21		78970,16	0	0,01
10:23		78970,18	0,54	0,02
10:25		78970,19	0	0,01
10:27	80-50-170-2	78970,2	0	0,01
10:29	80-50-170-2	78970,21	0,4	0,01
10:31	80-50-170-2	78970,21	0,38	0
10:33		78970,23	0	0,02
10:35		78970,24	0	0,01
10:37		78970,26	0	0,02
10:39		78970,27	0	0,01
10:41	80-100-180-2	78970,28	0	0,01
10:43	80-100-180-2	78970,29	0	0,01
10:45	80-100-180-2	78970,3	0,88	0,01
10:47		78970,32	1,24	0,02
10:49		78970,33	0	0,01
10:51	80-100-180-2b	78970,34	0,57	0,01
10:53	80-100-180-2b	78970,35	0	0,01
10:55	80-100-180-2b	78970,36	0	0,01
10:57	80-100-180-2b	78970,37	0	0,01
10:59		78970,38	0,46	0,01
11:01		78970,39	0	0,01
11:03		78970,41	0	0,02

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
11:05	100-50-180-1	78970,42	0	0,01
11:07	100-50-180-1	78970,43	0	0,01
11:09	100-50-180-1	78970,43	0	0
11:11		78970,45	0	0,02
11:13		78970,46	1,16	0,01
11:15		78970,47	0	0,01
11:17	100-50-180-1b	78970,48	0	0,01
11:19	100-50-180-1b	78970,49	0	0,01
11:21	100-50-180-1b	78970,5	0	0,01
11:23		78970,51	0,75	0,01
11:25		78970,52	1,07	0,01
11:27		78970,53	1,41	0,01
11:29		78970,55	0,94	0,02
11:31		78970,56	0,46	0,01
11:33		78970,57	0	0,01
11:35	100-50-180-2	78970,58	0,57	0,01
11:37	100-50-180-2	78970,59	0	0,01
11:39	100-50-180-2	78970,6	0	0,01
11:41		78970,61	0	0,01
11:43		78970,63	0,74	0,02
11:45		78970,64	1,18	0,01
11:47		78970,65	1,21	0,01
11:49	100-50-180-2b	78970,66	0	0,01
11:51	100-50-180-2b	78970,68	0	0,02
11:53	100-50-180-2b	78970,68	0	0
11:55		78970,7	0	0,02
11:57		78970,71	0	0,01

Hora	Placa	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
11:59		78970,72	0	0,01
12:01		78970,73	0	0,01
12:03		78970,74	0	0,01
12:05		78970,74	0,83	0
12:07		78970,75	1,37	0,01
12:09	100-50-170	78970,76	0,93	0,01
12:11	100-50-170	78970,76	0	0
12:13	100-50-170	78970,77	0,5	0,01
12:15		78970,78	0	0,01
12:17		78970,79	0,41	0,01
12:19		78970,8	0,52	0,01
12:21	80-50-170	78970,81	0	0,01
12:23	80-50-170	78970,82	0	0,01
12:25	80-50-170	78970,83	0	0,01
12:27		78970,84	0	0,01
12:29		78970,85	0	0,01
12:31		78970,86	0	0,01
12:33		78970,87	0	0,01
12:35		78970,88	0	0,01
12:37	80-50-170b	78970,89	0	0,01
12:39	80-50-170b	78970,9	0,83	0,01
12:41	80-50-170b	78970,91	0	0,01
12:43	80-50-170b	78970,92	0	0,01
12:45		78970,93	0,46	0,01
12:47		78970,94	0	0,01
12:49		78969,68	3,38	0

Annex G: Dades de consum energètic de la premsa

Les mesures energètiques es van fer de forma experimental connectant un analitzador de corrent a la premsa mentre es fabricaven les plaques. A partir dels resultats obtinguts, que es mostren a la taula, es pot veure que el consum és similar per totes les plaques i que inclou el consum per premsar i refrigerar la placa que és de 0,123 kWh per cada placa fabricada.

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
12:23			15422554	0	0
12:25			15422554	0	0
12:27			15422566	2,34	12
12:29			15422644	2,4	78
12:31			15422722	2,28	78
12:33			15422778	0	56
12:35			15422817	1,26	39
12:37			15422845	1,26	28
12:39			15422867	1,26	22
12:41			15422884	1,26	17
12:43			15422899	1,26	15
12:45			15422913	1,26	14
12:47			15422926	1,32	13
12:49			15422940	1,26	14
12:51			15422954	1,26	14
12:53			15422968	1,26	14
12:55			15422983	1,26	15
12:57			15422983	0	0
12:59			15422983	0	0
14:39			15422983	0	0
14:41			15422983	0	0

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
14:43			15423034	2,34	51
14:45			15423112	2,4	78
14:47			15423173	2,4	61
14:49			15423212	0	39
14:51			15423241	0	29
14:53			15423261	0	20
14:55			15423277	0	16
14:57			15423290	0	13
14:59			15423303	0	13
15:01			15423315	0	12
15:03			15423328	0	13
15:05			15423341	0	13
15:07			15423353	0	12
15:09			15423366	0	13
15:11			15423379	0	13
15:13			15423392	0	13
15:15			15423405	0	13
15:17			15423418	0	13
15:19			15423431	0	13
15:21			15423444	0	13
15:23			15423457	0	13
15:25			15423471	0	14
15:27			15423484	0	13
15:29			15423496	0	12
15:31			15423509	0	13
15:33			15423522	0	13
15:35			15423532	0	10

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
15:37			15423557	0	25
15:39	80-50-180-1	Premsat	15423574	0	17
15:41	80-50-180-1	Premsat	15423586	0	12
15:43	80-50-180-1	Premsat	15423606	0	20
15:45	80-50-180-1	Refrigeració	15423622	0	16
15:47	80-50-180-1	Refrigeració	15423640	0	18
15:49	80-50-180-1	Refrigeració	15423652	0	12
15:51	80-50-180-1	Refrigeració	15423663	0	11
15:53			15423674	0	11
15:55			15423685	0	11
15:57			15423695	0	10
15:59			15423706	0	11
16:01			15423732	0	26
16:03	90-50-180-1	Premsat	15423752	1,86	20
16:05	90-50-180-1	Premsat	15423765	0	13
16:07	90-50-180-1	Premsat	15423787	0	22
16:09	90-50-180-1	Premsat	15423805	0	18
16:11	90-50-180-1	Refrigeració	15423820	0,48	15
16:13	90-50-180-1	Refrigeració	15423831	1,38	11
16:15	90-50-180-1	Refrigeració	15423842	1,2	11
16:17			15423852	1,32	10
16:19			15423862	1,26	10
16:21			15423872	1,26	10
16:23			15423883	1,38	11
16:25			15423895	1,26	12
16:27			15423923	0	28
16:29	90-50-180-2	Premsat	15423940	1,86	17

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
16:31	90-50-180-2	Premnat	15423953	1,32	13
16:33	90-50-180-2	Premnat	15423974	0,3	21
16:35	90-50-180-2	Refrigeració	15423990	2,1	16
16:37	90-50-180-2	Refrigeració	15424008	1,98	18
16:39	90-50-180-2	Refrigeració	15424029	1,2	21
16:41	90-50-180-2	Refrigeració	15424029	0	0
16:43			15424040	1,08	11
16:45			15424050	1,14	10
16:47			15424060	1,2	10
16:49			15424071	1,2	11
16:51			15424081	1,38	10
16:53			15424108	2,1	27
16:55	65-50-180-1	Premnat	15424126	0	18
16:57	65-50-180-1	Premnat	15424138	0	12
16:59	65-50-180-1	Premnat	15424161	0,54	23
17:01	65-50-180-1	Refrigeració	15424180	2,1	19
17:03	65-50-180-1	Refrigeració	15424196	0	16
17:05	65-50-180-1	Refrigeració	15424200	0	4
17:07			15424200	0	0
17:09			15424200	0	0
17:11			15424200	0	0
17:13			15424200	0	0
17:15			15424200	0	0
17:17			15424200	0	0
17:19			15424200	0	0
17:21			15424200	0	0
17:23			15424200	0	0

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
17:25			15424200	0	0
17:27			15424200	0	0
17:29			15424247	1,98	47
17:31			15424288	1,98	41
17:33			15424317	1,98	29
17:35			15424336	1,8	19
17:37			15424349	0	13
17:39			15424359	0	10
17:41			15424369	0	10
17:43			15424378	0	9
17:45			15424388	0	10
17:47			15424398	0	10
17:49			15424413	0,24	15
17:51			15424437	1,38	24
17:53	65-50-180-2	Premsat	15424455	0	18
17:55	65-50-180-2	Premsat	15424466	0	11
17:57	65-50-180-2	Premsat	15424472	0	6
17:59	65-50-180-2	Refrigeració	15424472	0	0
18:01	65-50-180-2	Refrigeració	15424483	2,4	11
18:03	65-50-180-2	Refrigeració	15424523	1,74	40
18:05			15424547	0,3	24
18:07			15424562	0	15
18:09			15424572	0	10
18:11			15424581	0	9
18:13			15424590	0	9
18:15			15424599	0	9
18:17			15424609	0	10

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
18:19			15424635	0	26
18:21	80-50-180-2	Premsat	15424650	0,06	15
18:23	80-50-180-2	Premsat	15424664	0	14
18:25	80-50-180-2	Premsat	15424669	0	5
18:27	80-50-180-2	Premsat	15424669	0	0
18:29	80-50-180-2	Refrigeració	15424669	1,92	0
18:31	80-50-180-2	Refrigeració	15424714	0	45
18:33	80-50-180-2	Refrigeració	15424739	0	25
18:35			15424755	0	16
18:37			15424765	1,26	10
18:39			15424775	0	10
18:41			15424783	0	8
18:43			15424792	0	9
18:45			15424802	0	10
18:47			15424827	0	25
18:49	80-100-180-1	Premsat	15424844	0	17
18:51	80-100-180-1	Premsat	15424858	0	14
18:53	80-100-180-1	Premsat	15424863	0	5
18:55	80-100-180-1	Premsat	15424863	0	0
18:57	80-100-180-1	Refrigeració	15424868	2,34	5
18:59	80-100-180-1	Refrigeració	15424880	0	12
19:01	80-100-180-1	Refrigeració	15424880	0	0
19:03			15424880	0	0
Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
9:29			15424880	0	0,00
9:31			15424940	2,28	60,00
9:33			15425016	2,34	76,00

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
9:35			15425091	2,28	75,00
9:37			15425137	0,54	46,00
9:39			15425172	0	35,00
9:41			15425198	0	26,00
9:43			15425218	0	20,00
9:45			15425234	0	16,00
9:47			15425248	0	14,00
9:49			15425261	0	13,00
9:51			15425274	0	13,00
9:53			15425287	0	13,00
9:55			15425300	0	13,00
9:57			15425313	0	13,00
9:59			15425327	0	14,00
10:01			15425340	0	13,00
10:03			15425355	0	15,00
10:05			15425368	0	13,00
10:07			15425381	0	13,00
10:09			15425398	0	17,00
10:11			15425426	0	28,00
10:13	80-50-170-1	Premsat	15425444	0	18,00
10:15	80-50-170-1	Premsat	15425460	1,02	16,00
10:17	80-50-170-1	Premsat	15425483	0	23,00
10:19	80-50-170-1	Refrigerat	15425502	0	19,00
10:21	80-50-170-1	Refrigerat	15425518	0	16,00
10:23	80-50-170-1	Refrigerat	15425532	0	14,00
10:25	80-50-170-1	Refrigerat	15425544	0	12,00
10:27			15425555	0	11,00

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
10:29			15425567	0	12,00
10:31			15425579	0	12,00
10:33			15425624	1,02	45,00
10:35			15425624	0,36	0,00
10:37	80-50-170-2	Premsat	15425639	0	15,00
10:39	80-50-170-2	Premsat	15425662	0	23,00
10:41	80-50-170-2	Premsat	15425678	0	16,00
10:43	80-50-170-2	Refrigerat	15425696	0	18,00
10:45	80-50-170-2	Refrigerat	15425710	0	14,00
10:47	80-50-170-2	Refrigerat	15425723	0	13,00
10:49			15425734	0	11,00
10:51			15425746	1,26	12,00
10:53			15425757	1,32	11,00
10:55			15425768	1,44	11,00
10:57			15425780	1,26	12,00
10:59			15425807	0	27,00
11:01	80-100-180-1	Premsat	15425823	1,68	16,00
11:03	80-100-180-1	Premsat	15425837	1,44	14,00
11:05	80-100-180-1	Premsat	15425875	1,68	38,00
11:07	80-100-180-1	Premsat	15425875	0	0,00
11:09	80-100-180-1	Refrigerat	15425892	0,42	17,00
11:11	80-100-180-1	Refrigerat	15425903	1,44	11,00
11:13	80-100-180-1	Refrigerat	15425914	1,44	11,00
11:15			15425925	1,44	11,00
11:17			15425937	1,26	12,00
11:19			15425948	1,14	11,00
11:21			15425959	1,38	11,00

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
11:23			15425970	1,26	11,00
11:25			15425981	1,32	11,00
11:27			15425992	1,2	11,00
11:29			15426006	1,26	14,00
11:31			15426031	1,26	25,00
11:33	100-50-180-1	Premsat	15426049	0	18,00
11:35	100-50-180-1	Premsat	15426082	0	33,00
11:37	100-50-180-1	Premsat	15426082	0	0,00
11:39	100-50-180-1	Premsat	15426099	0,42	17,00
11:41	100-50-180-1	Refrigerat	15426117	0,72	18,00
11:43	100-50-180-1	Refrigerat	15426128	0	11,00
11:45	100-50-180-1	Refrigerat	15426139	0	11,00
11:47			15426150	0	11,00
11:49			15426160	0	10,00
11:51			15426171	0	11,00
11:53			15426181	0	10,00
11:55			15426192	0	11,00
11:57			15426202	0	10,00
11:59			15426213	1,32	11,00
12:01			15426241	0	28,00
12:03	100-50-180-2	Premsat	15426258	0,48	17,00
12:05	100-50-180-2	Premsat	15426272	0	14,00
12:07	100-50-180-2	Premsat	15426284	0	12,00
12:09	100-50-180-2	Premsat	15426297	2,4	13,00
12:11			15426317	0,24	20,00
12:13	100-50-180-2	Refrigerat	15426334	0,48	17,00
12:15	100-50-180-2	Refrigerat	15426347	0,24	13,00

Hora	Placa	Procés	Energia (kWh)	Potència activa (kW)	Diferencial d'energia (kWh)
12:17	100-50-180-2	Refrigerat	15426359	0	12,00
12:19	100-50-180-2	Refrigerat	15426370	0	11,00
12:21			15426381	0,12	11,00
12:23			15426391	0	10,00
12:25			15426401	0	10,00
12:27			15426412	0	11,00
12:29			15426423	0	11,00
12:31			15426434	0	11,00
12:33			15426445	0	11,00

Annex H: Dades de caracterització de totes les plaques

Obtenció de 1 kg de plomes estabilitzades amb vapor d'aigua

Calculation:	Analizar					
Results:	Evaluación del impacto					
Product:	1 kg Plomes estabilitzades amb autoclau (del proyecto Plomes)					
Método:	CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25					
Indicador:	Caracterización					
Skip categories:	Nunca					
Excluir procesos de infraestructura:	Sí					
Excluir emisiones a largo plazo:	Sí					
Sorted on item:	Categoría de impacto					
Sort order:	Ascendente					
Categoría de impacto		Unidad	Total	Estabilització de les plomes	Consum d'aigua	Consum d'electricitat
Esgotament de recursos no renovables	DMA	kg Sb eq	3,57E-08	0,00E+00	9,23E-09	2,65E-08
Esgotament de recursos fòssils	DMACF	MJ	6,03E+00	0,00E+00	1,43E+00	4,60E+00

Escalfament global (GWP100a)	GWP100a	kg CO2 eq	4,10E-01	0,00E+00	1,01E-01	3,10E-01
Esgotament de la capa d'ozó (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	6,41E-08	0,00E+00	2,36E-08	4,05E-08
Toxicitat humana	ToxH	kg 1,4-DB eq	3,84E-02	0,00E+00	1,30E-02	2,54E-02
Ecotoxicitat de les aigües continentals	EtoxAD	kg 1,4-DB eq	4,94E-03	0,00E+00	1,12E-03	3,82E-03
Ecotoxicitat marina	EtoxM	kg 1,4-DB eq	2,74E+02	0,00E+00	7,37E+01	2,00E+02
Ecotoxicitat terrestre	EtoxTer	kg 1,4-DB eq	2,09E-04	0,00E+00	3,18E-05	1,77E-04
Formació de fotoxidants	OxFQ	kg C2H4 eq	9,70E-05	0,00E+00	2,72E-05	6,98E-05
Acidificació	Acidif.	kg SO2 eq	2,42E-03	0,00E+00	6,90E-04	1,72E-03
Eutrofització	Eutrof.	kg PO4--- eq	7,58E-04	5,86E-04	4,97E-05	1,22E-04
Ocupació de terreny agrícola	OcTerA	m2a	5,26E-03	0,00E+00	2,44E-03	2,82E-03
Ocupació de terreny urbà	OcTerU	m2a	1,47E-03	0,00E+00	5,08E-04	9,59E-04
Transformació del territori natural	OcTerN	m2	9,29E-06	0,00E+00	3,16E-06	6,13E-06

Obtenció de 1 kg de plomes estabilitzades amb tensioactiu

Calculation:	Analizar						
Results:	Evaluación del impacto						
Product:	1 kg Plomes estabilitzades amb tensioactiu (del proyecto Plomes)						
Método:	CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25						
Indicador:	Caracterización						
Skip categories:	Nunca						
Excluir procesos de infraestructura:	Sí						
Excluir emisiones a largo plazo:	Sí						
Sorted on item:	Categoría de impacto						
Sort order:	Ascendente						
Categoría de impacto		Unidad	Total tensioactiu	Estabilització de les plomes	Consum d'aigua	Tensioactiu	Consum d'electricitat
Esgotament de recursos no renovables	DMA	kg Sb eq	9,65E-07	0,00E+00	6,33E-08	5,70E-07	3,32E-07
Esgotament de recursos fòssils	DMACF	MJ	1,03E+02	0,00E+00	9,81E+00	3,61E+01	5,75E+01
Escalfament global (GWP100a)	GWP100a	kg CO2 eq	5,86E+00	0,00E+00	6,90E-01	1,29E+00	3,87E+00
Esgotament de la capa d'ozó (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	8,06E-07	0,00E+00	1,62E-07	1,38E-07	5,06E-07

Toxicitat humana	ToxH	kg 1,4-DB eq	5,72E-01	0,00E+00	8,89E-02	1,66E-01	3,17E-01
Ecotoxicitat de les aigües continentals	EtoxAD	kg 1,4-DB eq	1,07E-01	0,00E+00	7,69E-03	5,18E-02	4,78E-02
Ecotoxicitat marina	EtoxM	kg 1,4-DB eq	3,42E+03	0,00E+00	5,05E+02	4,10E+02	2,51E+03
Ecotoxicitat terrestre	EtoxTer	kg 1,4-DB eq	2,59E-03	0,00E+00	2,18E-04	1,59E-04	2,21E-03
Formació de fotoxidants	OxFQ	kg C2H4 eq	1,88E-03	0,00E+00	1,87E-04	8,18E-04	8,72E-04
Acidificació	Acidif.	kg SO2 eq	3,53E-02	0,00E+00	4,73E-03	8,95E-03	2,16E-02
Eutrofització	Eutrof.	kg PO4--- eq	4,59E-02	4,06E-02	3,41E-04	3,40E-03	1,53E-03
Ocupació de terreny agrícola	OcTerA	m2a	6,21E-02	0,00E+00	1,67E-02	1,01E-02	3,53E-02
Ocupació de terreny urbà	OcTerU	m2a	1,75E-02	0,00E+00	3,48E-03	2,01E-03	1,20E-02
Transformació del territori natural	OcTerN	m2	1,10E-04	0,00E+00	2,17E-05	1,18E-05	7,67E-05

Trituració de 1 kg de plomes netes i seques

Calculation:	Analizar		
Results:	Evaluación del impacto		
Product:	1 kg Trituracio plomes (del proyecto Plomes)		
Método:	CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25		
Indicador:	Caracterización		
Skip categories:	Nunca		
Excluir procesos de infraestructura:	Sí		
Excluir emisiones a largo plazo:	Sí		
Sorted on item:	Categoría de impacto		
Sort order:	Ascendente		
	Categoría de impacto	Unidad	Trituracio plomes
Esgotament de recursos no renovables	DMA	kg Sb eq	1,86E-07
Esgotament de recursos fòssils	DMACF	MJ	3,23E+01
Escalfament global (GWP100a)	GWP100a	kg CO2 eq	2,18E+00
Esgotament de la capa d'ozó (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	2,84E-07

Toxicitat humana	ToxH	kg 1,4-DB eq	1,78E-01
Ecotoxicitat de les aigües continentals	EtoxAD	kg 1,4-DB eq	2,68E-02
Ecotoxicitat marina	EtoxM	kg 1,4-DB eq	1,41E+03
Ecotoxicitat terrestre	EtoxTer	kg 1,4-DB eq	1,24E-03
Formació de fotoxidants	OxFQ	kg C2H4 eq	4,90E-04
Acidificació	Acidif.	kg SO2 eq	1,21E-02
Eutrofització	Eutrof.	kg PO4--- eq	8,57E-04
Ocupació de terreny agrícola	OcTerA	m2a	1,98E-02
Ocupació de terreny urbà	OcTerU	m2a	6,74E-03
Transformació del territori natural	OcTerN	m2	4,31E-05

Fabricació placa 75/25

Calculation:	Analizar						
Results:	Evaluación del impacto						
Product:	1 p g Placa 075%PLA-25%plomes (autoclau) (del proyecto Plomes)						
Método:	CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25						
Indicador:	Caracterización						
Skip categories:	Nunca						
Excluir processos de infraestructura:	Sí						
Excluir emisiones a largo plazo:	Sí						
Sorted on item:	Categoría de impacto						
Sort order:	Ascendente						
Categoría de impacto	Unidad	Total	PLA for composite	Plomes estabilitzades amb autoclau	Trituracio plomes	Fabricació composite	
Abiotic depletion	DMA	kg Sb eq	6,81E-08	5,37E-08	1,71E-09	4,31E-09	8,35E-09
Abiotic depletion (fossil fuels)	DMACF	MJ	5,60E+00	3,11E+00	2,88E-01	7,46E-01	1,45E+00
Global warming (GWP100a)	GWP100a	kg CO2 eq	4,00E-01	2,32E-01	1,96E-02	5,03E-02	9,76E-02

Ozone layer depletion (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	3,28E-08	1,04E-08	3,07E-09	6,58E-09	1,28E-08
Human toxicity	ToxH	kg 1,4-DB eq	3,77E-02	2,38E-02	1,84E-03	4,12E-03	8,00E-03
Fresh water aquatic ecotox.	EtoxAD	kg 1,4-DB eq	2,08E-02	1,88E-02	2,37E-04	6,20E-04	1,20E-03
Marine aquatic ecotoxicity	EtoxM	kg 1,4-DB eq	2,21E+02	1,12E+02	1,31E+01	3,25E+01	6,31E+01
Terrestrial ecotoxicity	EtoxTer	kg 1,4-DB eq	6,27E-04	5,33E-04	9,98E-06	2,87E-05	5,57E-05
Photochemical oxidation	OxFQ	kg C2H4 eq	9,25E-05	5,45E-05	4,64E-06	1,13E-05	2,20E-05
Acidification	Acidif.	kg SO2 eq	2,44E-03	1,50E-03	1,16E-04	2,80E-04	5,43E-04
Eutrophication	Eutrof.	kg PO4--- eq	5,23E-04	4,28E-04	3,63E-05	1,98E-05	3,84E-05
Agricultural land occupation	OcTerA	m2a	8,16E-02	8,01E-02	2,52E-04	4,58E-04	8,89E-04
Urban land occupation	OcTerU	m2a	4,90E-03	4,38E-03	7,02E-05	1,56E-04	3,02E-04
Natural land transformation	OcTerN	m2	7,88E-06	4,51E-06	4,45E-07	9,96E-07	1,93E-06

Fabricació placa 80/20

Calculation:	Analizar						
Results:	Evaluación del impacto						
Product:	1 p g Placa 080%PLA-20%plomes (autoclau) (del proyecto Plomes)						
Método:	CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25						
Indicador:	Caracterización						
Skip categories:	Nunca						
Excluir procesos de infraestructura:	Sí						
Excluir emisiones a largo plazo:	Sí						
Sorted on item:	Categoría de impacto						
Sort order:	Ascendente						
Categoría de impacto		Unidad	Total	PLA for composite	Plomes estabilitzades amb autoclau	Trituracio plomes	Fabricació composite
Abiotic depletion	DMA	kg Sb eq	7,05E-08	5,73E-08	1,37E-09	3,45E-09	8,35E-09
Abiotic depletion (fossil fuels)	DMACF	MJ	5,60E+00	3,32E+00	2,31E-01	5,97E-01	1,45E+00
Global warming (GWP100a)	GWP100a	kg CO2 eq	4,01E-01	2,48E-01	1,57E-02	4,02E-02	9,76E-02
Ozone layer depletion (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	3,16E-08	1,11E-08	2,45E-09	5,26E-09	1,28E-08

Human toxicity	ToxH	kg 1,4-DB eq	3,81E-02	2,53E-02	1,47E-03	3,30E-03	8,00E-03
Fresh water aquatic ecotox.	EtoxAD	kg 1,4-DB eq	2,19E-02	2,00E-02	1,89E-04	4,96E-04	1,20E-03
Marine aquatic ecotoxicity	EtoxM	kg 1,4-DB eq	2,19E+02	1,20E+02	1,05E+01	2,60E+01	6,31E+01
Terrestrial ecotoxicity	EtoxTer	kg 1,4-DB eq	6,55E-04	5,68E-04	7,98E-06	2,30E-05	5,57E-05
Photochemical oxidation	OxFQ	kg C2H4 eq	9,29E-05	5,82E-05	3,71E-06	9,07E-06	2,20E-05
Acidification	Acidif.	kg SO2 eq	2,46E-03	1,60E-03	9,25E-05	2,24E-04	5,43E-04
Eutrophication	Eutrof.	kg PO4--- eq	5,40E-04	4,57E-04	2,90E-05	1,59E-05	3,84E-05
Agricultural land occupation	OcTerA	m2a	8,68E-02	8,54E-02	2,01E-04	3,66E-04	8,89E-04
Urban land occupation	OcTerU	m2a	5,15E-03	4,67E-03	5,62E-05	1,25E-04	3,02E-04
Natural land transformation	OcTerN	m2	7,90E-06	4,81E-06	3,56E-07	7,97E-07	1,93E-06

Fabricació placa 90/10

Calculation:	Analizar						
Results:	Evaluación del impacto						
Product:	1 p g Placa 090%PLA-10%plomes (autoclau) (del projecto Plomes)						
Método:	CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25						
Indicador:	Caracterización						
Skip categories:	Nunca						
Excluir procesos de infraestructura:	Sí						
Excluir emisiones a largo plazo:	Sí						
Sorted on item:	Categoría de impacto						
Sort order:	Ascendente						
Categoría de impacto		Unidad	Total	Poly lactide, granulate {GLO} market for Alloc Def, U	Plomes estabilitzades amb autoclau	Trituracio plomes	Fabricació composite
Abiotic depletion	DMA	kg Sb eq	7,51E-08	6,43E-08	6,84E-10	1,72E-09	8,35E-09
Abiotic depletion (fossil fuels)	DMACF	MJ	5,57E+00	3,71E+00	1,15E-01	2,99E-01	1,45E+00
Global warming (GWP100a)	GWP100a	kg CO2 eq	4,02E-01	2,76E-01	7,85E-03	2,01E-02	9,76E-02

Ozone layer depletion (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	2,89E-08	1,23E-08	1,23E-09	2,63E-09	1,28E-08
Human toxicity	ToxH	kg 1,4-DB eq	3,87E-02	2,83E-02	7,34E-04	1,65E-03	8,00E-03
Fresh water aquatic ecotox.	EtoxAD	kg 1,4-DB eq	2,41E-02	2,25E-02	9,46E-05	2,48E-04	1,20E-03
Marine aquatic ecotoxicity	EtoxM	kg 1,4-DB eq	2,15E+02	1,33E+02	5,25E+00	1,30E+01	6,31E+01
Terrestrial ecotoxicity	EtoxTer	kg 1,4-DB eq	7,09E-04	6,38E-04	3,99E-06	1,15E-05	5,57E-05
Photochemical oxidation	OxFQ	kg C2H4 eq	9,34E-05	6,50E-05	1,86E-06	4,53E-06	2,20E-05
Acidification	Acidif.	kg SO2 eq	2,49E-03	1,79E-03	4,62E-05	1,12E-04	5,43E-04
Eutrophication	Eutrof.	kg PO4--- eq	5,74E-04	5,13E-04	1,45E-05	7,93E-06	3,84E-05
Agricultural land occupation	OcTerA	m2a	9,72E-02	9,60E-02	1,01E-04	1,83E-04	8,89E-04
Urban land occupation	OcTerU	m2a	5,64E-03	5,25E-03	2,81E-05	6,23E-05	3,02E-04
Natural land transformation	OcTerN	m2	7,88E-06	5,37E-06	1,78E-07	3,98E-07	1,93E-06

Fabricació placa 100 PLA

Calculation:	Analizar				
Results:	Evaluación del impacto				
Product:	1 p g Placa 100%PLA-%plomes (autoclau) (del proyecto Plomes)				
Método:	CML-IA baseline amb land occupation V3.01 / EU25				
Indicador:	Caracterización				
Skip categories:	Nunca				
Excluir procesos de infraestructura:	Sí				
Excluir emisiones a largo plazo:	Sí				
Sorted on item:	Categoría de impacto				
Sort order:	Ascendente				
Categoría de impacto	Unidad	Total	Polylactide, granulate {GLO} market for Alloc Def, U		Fabricació composite
Abiotic depletion	DMA	kg Sb eq	7,98E-08	7,14E-08	8,35E-09
Abiotic depletion (fossil fuels)	DMACF	MJ	5,57E+00	4,12E+00	1,45E+00
Global warming (GWP100a)	GWP100a	kg CO2 eq	4,05E-01	3,07E-01	9,76E-02
Ozone layer depletion (ODP)	ODP	kg CFC-11 eq	2,64E-08	1,36E-08	1,28E-08

Human toxicity	ToxH	kg 1,4-DB eq	3,95E-02	3,15E-02	8,00E-03
Fresh water aquatic ecotox.	EtoxAD	kg 1,4-DB eq	2,62E-02	2,50E-02	1,20E-03
Marine aquatic ecotoxicity	EtoxM	kg 1,4-DB eq	2,11E+02	1,48E+02	6,31E+01
Terrestrial ecotoxicity	EtoxTer	kg 1,4-DB eq	7,65E-04	7,09E-04	5,57E-05
Photochemical oxidation	OxFQ	kg C2H4 eq	9,42E-05	7,22E-05	2,20E-05
Acidification	Acidif.	kg SO2 eq	2,53E-03	1,99E-03	5,43E-04
Eutrophication	Eutrof.	kg PO4 ⁻⁻⁻ eq	6,09E-04	5,70E-04	3,84E-05
Agricultural land occupation	OcTerA	m2a	1,08E-01	1,07E-01	8,89E-04
Urban land occupation	OcTerU	m2a	6,13E-03	5,83E-03	3,02E-04
Natural land transformation	OcTerN	m2	7,90E-06	5,97E-06	1,93E-06