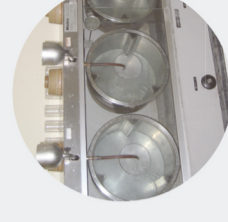
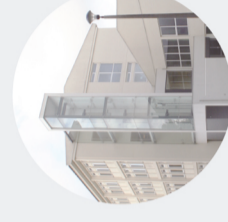
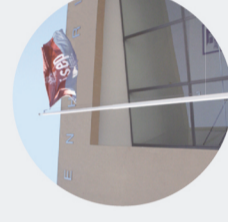




Valorização da raspa tripa e raspa verde da indústria de curtumes para a obtenção de gordura

IVAN LEONEL OLIVEIRA E SILVA

novembro de 2018



Valorização da raspa tripa e raspa verde da indústria de curtumes para a obtenção de gordura

IVAN LEONEL OLIVEIRA E SILVA
Novembro de 2018



Agradecimentos

Prestes a terminar esta etapa, são várias as pessoas a quem eu devo agradecer pela sua contribuição, direta ou indireta, mas certamente essencial para a conclusão desta dissertação.

Em primeiro lugar, não poderia deixar de expressar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Doutor António Crispim, pela orientação, partilha de conhecimento, incentivo e disponibilidade.

Ao Engenheiro Maia Miranda, o co-orientador deste trabalho, pela orientação e partilha de conhecimentos

À Engenheira Vânia Silva agradeço pela orientação a nível prático e pela disponibilidade para esclarecimento de dúvidas.

À Doutora Paula Neto agradeço a disponibilidade pela ajuda prestada ao longo de quase um capítulo desta dissertação. Sem dúvida muito importante.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química porque sem os conhecimentos adquiridos através das suas aulas este trabalho não fluía.

À minha família agradeço toda a paciência, carinho e apoio incondicional que sempre me prestaram ao longo desta etapa que agora termina.

Resumo

A indústria de curtumes é causadora de um grande impacto negativo para o meio ambiente através da sua atividade produtiva, onde se incluem os resíduos sólidos e os efluentes líquidos.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de um processo minimizador de dois dos resíduos sólidos da indústria do couro: a raspa verde e a raspa tripa, propondo a construção de uma instalação para a produção de gordura a partir das mesmas. De referir que o trabalho laboratorial que serviu de suporte ao trabalho foi realizado no Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial (CIETI), em colaboração com empresa Luís Leal & Filhos.

Estima-se que em Portugal se produzam cerca de 30 toneladas diárias de raspa para aterro, sendo que 25% corresponde à raspa verde e, os restantes 75%, à raspa tripa.

Na avaliação do processo realizaram-se tratamentos de hidrólise térmica e enzimática para a obtenção de gordura. Na hidrólise térmica da raspa verde obteve-se um rendimento de extração em torno de 44%, e na da raspa tripa o valor situou-se nos 48%.

A raspa verde foi sujeita a ensaios enzimáticos em que as variáveis estudadas foram a quantidade de enzima e o tempo de hidrólise, concluindo-se que tais variáveis não influenciam em muito o rendimento da hidrólise.

Ao longo do trabalho laboratorial realizado constatou-se a heterogeneidade das amostras de resíduos. Por outro lado, o potencial económico da gordura gerada a partir destas foi confirmado.

Depois de validado o potencial destes subprodutos para a produção de gordura, propôs-se dois processos, um em regime descontínuo e outro em regime contínuo para aplicação em meio industrial. Com estes processos pode-se chegar a produzir cerca de 14 toneladas diárias de gordura, a partir das 30 toneladas geradas diariamente de raspa tripa e verde de bovino pela indústria do couro.

O processo de valorização estudado tem uma dupla vantagem, visto que ajuda a indústria das peles a reduzir o impacto ambiental e permite a produção de produtos alternativos, neste caso, a gordura animal.

Palavras-chave: curtumes; gordura; hidrólise; raspa tripa; raspa verde; rendimento; resíduos.

Abstract

The tanning industry is causing a large and negative impact on the environment with the production activity, as example the solid waste and liquid effluents that this industry produces.

The present work aims to study a process that minimizes two of the solid residues of the tanning industry, proposing the installation of an unit to produce fat from the green and lime fleshings. All the laboratory work was developed and supported by the Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial (CIETI), in collaboration with Luís Leal & Filhos.

It is estimated that in Portugal are produced about 30 ton per day of fleshings, 25% of which corresponds to green fleshings and the remaining 75% to lime fleshings.

In the process evaluation, thermal and enzymatic hydrolysis were applied to obtain fat. In the thermal hydrolysis of the green fleshings the hydrolysis yield was around 44% and in the lime fleshings hydrolysis was around 48%.

The green fleshings were exposed to enzymatic analysis in which the variables studied were the amount of enzyme and the time of hydrolysis, concluding that these variables do not have a significant influence in the hydrolysis yield.

During the laboratory work, the heterogeneity of the waste samples was verified and the economic potential of fat generated from these has been confirmed.

After validating the potential of these subproducts for the fat production, two processes were proposed, one in batch and another in continuous regime for application in industry. With these processes, it is possible to produce about 14 tons of fat per day, from the 30 tons of green and lime fleshing daily generated by the leather industry.

The valorization process studied has two advantages, since it helps the leather industry to reduce the environmental impact and allows the production of alternative products adding value to the waste generated, in this case the animal fat

Keywords: tanning; fat; hydrolysis; green fleshings; lime fleshings; waste; yield.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
1. Introdução	1
1.1 Luís Leal & Filhos	1
1.2 Enquadramento e Objetivos	2
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2. Estado de Arte	5
2.1 Processo Produtivo da Indústria de Curtumes	5
2.2 Impacto Ambiental.....	12
2.3 Raspa Tripa e Raspa Verde	15
3. Material e Métodos	19
3.1 Caracterização da Raspa.....	19
3.2 Obtenção de Gordura	20
3.3 Caracterização da Gordura.....	21
4. Resultados e Discussão	23
4.1 Caracterização da Raspa.....	23
4.2 Obtenção de Gordura	24
4.3 Caracterização da Gordura.....	25
5. Proposta de Instalação	27
5.1 Regime Descontínuo.....	27
5.2 Regime Contínuo.....	37
5.3 Considerações sobre o tratamento e as instalações	43
6. Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	45
Bibliografia	47
Anexos	49

Índice de Figuras

Figura 1.1: A empresa Luís Leal & Filhos, em Arrifana	1
Figura 2.1: Pilhas de pele em bruto, conservadas através da salga.....	5
Figura 2.2: Operação de descarna.....	6
Figura 2.3: Fulão.....	8
Figura 2.4: Secagem de peles com transportador aéreo às condições ambientais e com estufa, respetivamente	9
Figura 2.5: Fluxograma do processo de curtumes e os consequentes resíduos gerados	11
Figura 3.1: Aspetos da raspa verde, à direita, e da raspa tripa, à esquerda.....	19
Figura 4.1: Gordura proveniente da raspa verde depois da hidrólise térmica.....	24
Figura 5.1: Esquema representativo do regime descontínuo	28
Figura 5.2: Produção diária de gordura proveniente da raspa verde.....	28
Figura 5.3: Produção diária de gordura proveniente da raspa tripa.....	29
Figura 5.4: Sistema de agitação em dupla hélice.....	36
Figura 5.5: Esquema representativo do regime contínuo	37
Figura 5.6: Sistema de um transportador em parafuso	42

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Balanço de massa médio do processo produtivo convencional do couro.	12
Tabela 2.2: Código LER para os resíduos da indústria do couro	13
Tabela 2.3: Valores de referência de ácidos gordos na composição do sebo de bovino	17
Tabela 2.4: Valores de referência para a gordura animal.....	17
Tabela 3.1: Ensaio realizado da hidrólise enzimática da raspa verde.....	21
Tabela 5.1: Dimensões do reator em regime descontínuo	30
Tabela 5.2: Propriedades físicas do ar a 30 °C.....	32
Tabela 5.3: Cálculo do h_{topo}	33
Tabela 5.4: Cálculo do h_{lat}	34
Tabela 5.5: Balanço de energia ao reator	34
Tabela 5.6: Características do agitador em dupla hélice.....	37
Tabela 5.7: Dimensões do reator em regime contínuo.....	39
Tabela 5.8: Cálculo do h_{lat}	40
Tabela 5.9: Balanço de energia ao reator	41
Tabela 5.10: Características do agitador em parafuso.....	43
Tabela B.1: Resultados obtidos na caracterização da raspa verde.....	57
Tabela B.2: Resultados obtidos para o teor de gordura da raspa verde.....	58
Tabela B.3: Resultados obtidos na caracterização da raspa tripa.....	58
Tabela B.4: Resultados obtidos para o teor de gordura da raspa tripa.....	58
Tabela B.5: Resultados obtidos para o teor de humidade da gordura proveniente da raspa verde.....	59
Tabela B.6: Resultados obtidos para o índice de acidez da gordura proveniente da raspa verde.....	59
Tabela B.7: Resultados obtidos para o número de iodo da gordura proveniente da raspa verde.....	60
Tabela B.8: Resultados obtidos para o teor de humidade da gordura proveniente da raspa tripa.....	60
Tabela B.9: Resultados obtidos para o índice de acidez da gordura proveniente da raspa tripa.....	60
Tabela B.10: Resultados obtidos para o número de iodo da gordura proveniente da raspa tripa.....	61

Abreviaturas

Sigla	Descrição
CBO	Carência Biológica de Oxigénio
CIETI	Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial
CQO	Carência Química de Oxigénio
CTIC	Centro Tecnológico das Indústrias do Couro
LER	Lista Europeia de Resíduos
SS	Sólidos Suspensos

Letras Gregas

Letra	Descrição	Unidades
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$
μ	Viscosidade	kg/m.s
β	Coefficiente de expansão volumétrica do fluido	K^{-1}
η	Rendimento	%
ε	Emissividade	---
ρ	Massa Volúmica	kg/m ³

Nomenclatura

Sigla	Descrição	Unidades
A_{lat}	Área do topo do reator	m ²
A_{topo}	Área da lateral curva do reator	m ²
A_{ml}	Área média logarítmica entre a superfície externa do revestimento em contacto com o vapor e a superfície externa em contacto com o ar atmosférico	m ²
$C_{p \text{ raspa}}$	Capacidade calorífica da raspa	kJ/kg.K
D_a	Diâmetro do agitador	m
d_e	Diâmetro externo do reator	m
D_e	Diâmetro externo do reator com isolamento	m
d_i	Diâmetro interno do reator	m
g	Aceleração da gravidade	9,8 m/s ²
Gr	Número de Grashof	---
h	Altura do reator	m

h_{lat}	Coeficiente de transferência de calor por convecção da lateral do reator	W/m ² .K
h_{topo}	Coeficiente de transferência de calor por convecção do topo do reator	W/m ² .K
H_e	Entalpia da mistura à entrada	kW
H_s	Entalpia da mistura à saída	kW
k	Condutividade térmica	W/m.K
L_a	Comprimento do agitador	m
L_{reator}	Comprimento do reator	m
m	massa	g
\dot{m}_{raspa}	Caudal de raspa	kg/h
\dot{m}_v	Caudal de vapor	kg/h
N	Velocidade rotacional	rpm
N_p	Número da potência	---
P	Potência Elétrica	kW
Pr	Número de Prandtl	---
q	Potência térmica total necessária à reação	kW
q_{cond}	Potência de condução	kW
q_{conv}	Potência de convecção	kW
q_{rad}	Potência de radiação	kW
q_{reator}	Potência térmica necessária ao aquecimento da raspa	kW
Q_v	Caudal volumétrico	m ³ /h
Re	Número de Reynolds	---
t	Tempo	s
T_r	Temperatura de reação	°C
T_p	Temperatura da parede externa do isolamento	°C
T_s	Temperatura de saída do reator contínuo	°C
T_v	Temperatura do vapor	°C
T_i	Temperatura inicial no reator descontínuo	°C
T_f	Temperatura final no reator descontínuo	°C
T_∞	Temperatura do fluido envolvente	°C
V_{reator}	Volume do reator	m ³

1. Introdução

Esta dissertação enquadra-se na disciplina Dissertação/Estágio do Mestrado em Engenharia Química, ramo de Energia e Biorrefinaria, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e realizou-se no Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial (CIETI), em colaboração com empresa Luís Leal & Filhos.

1.1 Luís Leal & Filhos

A empresa Luís Leal & Filhos dedica-se à recolha, transporte e transformação de subprodutos derivados do abate de animais que não entram na cadeia alimentar humana, como rações e sabões, para produzir, entre outros, o biodiesel.



Figura 1.1: A empresa Luís Leal & Filhos, em Arrifana

Com sede em Torres Novas, onde se encontra também uma unidade logística de armazenamento, a Luís Leal & Filhos tem a atividade espalhada por várias zonas do país: armazéns em Mosteirô e fábrica na Arrifana (Figura 1.1), ambos em Santa Maria da Feira. As indústrias de comida para animais, as fábricas de rações e de fabrico de sabões, bem como a Direção-Geral de Alimentação e Veterinária (DGAV) e empresas de biodiesel, são os principais clientes da empresa que emprega cerca de 100 trabalhadores. Em 2015, foi a PME do ano. (Luís Leal & Filhos S.A., 2015)

1.2 Enquadramento e Objetivos

A indústria de curtumes produz couro a partir de pele animal, utilizando um produto que poderia ser um resíduo, transformando-o num de elevado valor. Todo este processo é bastante complexo e gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas, com um elevado grau de poluição para o meio ambiente.

Com uma tendência crescente de consciencialização para os problemas ambientais e energéticos ao longo das últimas décadas, a indústria tem encarado com seriedade a implementação de medidas corretivas para minimizar os efeitos negativos das suas operações. A indústria de curtumes não é exceção e, com a necessária preocupação, tem investido fortemente para controlar e diminuir toda a emissão de resíduos do processamento das peles.

As raspas, tripa e verde, são resíduos sólidos gerados na descarna, uma operação do processo de curtume. De origem animal, estes resíduos são uma fonte de gordura considerável e, em Portugal, são depositados em aterro. Nos últimos anos têm sido feitos estudos para a valorização deste resíduo da indústria das peles. Dados do Centro Tecnológico das Indústrias do Couro (CTIC) apontam para uma geração média diária de 30 toneladas de raspa, sendo estimado 20% de raspa verde e o restante raspa tripa.

Este trabalho tem como principal objetivo a proposta de um processo para extrair a gordura da raspa. Para fundamentar a proposta será efetuado algum trabalho laboratorial de suporte, nomeadamente a caracterização das raspas e avaliação do potencial de obtenção da gordura.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos que sustentam todo o trabalho desenvolvido.

O capítulo 1 consiste numa breve abordagem da empresa, no enquadramento do trabalho e estabelecimento dos seus objetivos, além de apresentar a estrutura do documento.

1. INTRODUÇÃO

No capítulo 2, denominado estado de arte, são introduzidos os temas mais relevantes para este trabalho, nomeadamente o processo industrial da indústria de curtumes, o seu impacto ambiental, as raspas verde e tripa e o potencial da sua valorização.

O capítulo 3 apresenta o trabalho laboratorial realizado, nomeadamente a caracterização das raspas, ensaios de obtenção da gordura, bem como a sua caracterização.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho laboratorial realizado e a sua importância para a proposta de instalação a fazer.

O capítulo 5 apresenta as propostas de instalação industrial para a obtenção de gordura a partir das raspas verde e tripa.

No último capítulo encontram-se as conclusões, bem como algumas sugestões de estudo para trabalhos futuros.

1. INTRODUÇÃO

2. Estado de Arte

Neste capítulo aborda-se o processo produtivo da indústria de curtumes, seguido do impacto desta indústria no sector. Seguidamente, é referido o problema em estudo, ou seja, uma breve explicação acerca do que são as raspas tripa e verde, assim como de possíveis soluções para a sua valorização.

2.1 Processo Produtivo da Indústria de Curtumes

O processo da indústria de curtumes é, normalmente, comum a todas as empresas deste setor, podendo haver pequenas alterações consoante a pele seja proveniente de bovino ou de outro tipo de animal.

As peles, previamente conservadas nos matadouros por processos de salga e salmoura, são recolhidas, rececionadas e dispostas por lotes de acordo com a sua qualidade, peso e tamanho (Figura 2.1). De seguida, a pele entra no processo produtivo que é dividido em quatro fases: fase de ribeira, fase de curtume, fase de recurtume e tinturaria, e fase de acabamento. Cada fase é constituída por várias etapas. No diagrama da Figura 2.5 está representado o processo produtivo convencional do tratamento da pele de bovino na indústria do couro, bem como os resíduos gerados ao longo do processo.



Figura 2.1: Pilhas de pele em bruto, conservadas através da salga

- **Ribeira**

O processamento das peles inicia-se com a fase de ribeira, depois de rececionadas como *wet-salted*. Esta fase caracteriza-se por ter operações de natureza química, em meio aquoso, e operações mecânicas.

A etapa de **molho** consiste no tratamento da pele em banho aquoso para remover o sangue, a bosta e o sal usado na conservação, com o objetivo de hidratar a pele para as fases posteriores. Os produtos químicos mais utilizados são aditivos e enzimas.

Segue-se a etapa de **caleiro** onde se dá a remoção do pelo usando hidróxido de cálcio e sulfureto de sódio. O sulfureto atua sobre a queratina do pelo e da camada epidérmica destruindo as pontes de enxofre que estabilizam a proteína. Como esta etapa se dá em meio alcalino, simultaneamente ocorre o relaxamento da estrutura fibrosa.

Na **descarna mecânica** (Figura 2.2) ocorre a raspagem mecânica do material orgânico excessivo presente na pele, como o tecido conjuntivo e a gordura. As peles são transportadas através de rolo adequado contra um rolo de lâminas. Esta etapa pode ocorrer antes do molho denominando-se por descarna verde. No fim desta etapa, a pele encontra-se no estado tripa.

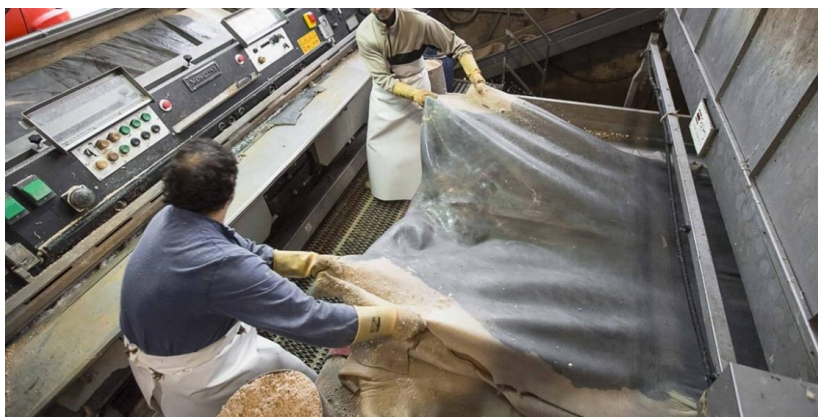


Figura 2.2: Operação de descarna

A **divisão** da pele tem como objetivo produzir peles com uma espessura definida através de uma lâmina de aço. Daqui resultam duas camadas, a crute (parte interior e com menos valor) e a camada principal. A crute pode ser aproveitada após uma

aparação. Esta etapa também pode ocorrer depois da fase de curtume, uma vez que, em estado tripa, esta operação é mais difícil de ser realizada. Por outro lado, sendo feita imediatamente depois da descarna mecânica, a produção de resíduos curtidos é menor.

- **Curtume**

A fase de curtume recebe as peles em tripa que seguem para um tratamento de modo a ficarem termicamente estáveis e resistentes à putrefação.

A **desencalagem** é realizada para reduzir o pH da pele e é feita em meio aquoso com sais de amônio, bissulfito de sódio e ácidos fracos.

O tratamento de **purga** realiza-se com enzimas e tem como objetivo o relaxamento da estrutura da pele e eliminar restos de epiderme e de pelo que possam ter ficado depois da descarna.

Segue-se a **piquelagem** onde se criam as condições necessárias para a pele receber o agente de curtume, reduzindo o valor do pH da pele para valores em torno de 3,0. Este tratamento, que consiste na utilização de cloreto de sódio, seguida da acidificação da pele, normalmente efetuada com ácido sulfúrico e ácido fórmico, permite, se necessário, a preservação em *stock* das peles por longos períodos de tempo.

A etapa central de todo o processo, o **curtume**, que se realiza em fulões (máquina tipo tambor rotativo), permite que a fibra de colagénio seja estabilizada pelos agentes de curtume, de modo a que a pele não fique mais suscetível à putrefação e com as propriedades adequadas à utilização posterior. O agente de curtume pode ser de origem mineral ou orgânica. O agente mais usado é o crómio (origem mineral), apresentando as peles curtidas com este, uma tonalidade azul, designando-se assim de *wet-blue*. Quando são usados outros agentes minerais designa-se de *wet-white*. Um exemplo de curtume orgânico são os extratos vegetais. Esta etapa deve ser precedida por um desengorduramento caso as peles tenham origem em animais com pele mais gordurosa, como é o caso dos ovinos.

Por último, o **escorrimento**, uma operação mecânica que permite a eliminação da água contida na pele, sendo esta espremida entre rolos e ao mesmo tempo estirada.

- **Recurtume**

Esta fase do processo serve essencialmente para dar algumas propriedades químicas à pele, como a aptidão para a lixagem, textura e cor e é efetuada em meio aquoso. Todos os processos químicos ocorrem num fulão (Figura 2.3).

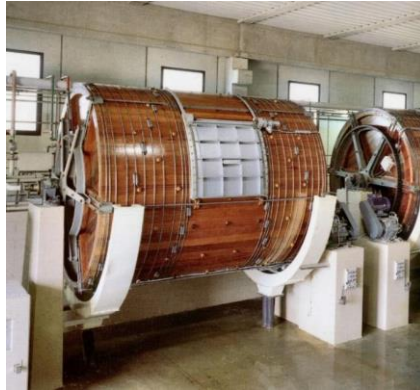


Figura 2.3: Fulão

A única etapa mecânica desta fase é o **rebaixamento**. Como já referido, o rebaixamento pode ser precedido pela divisão, e uma vez que esta é pouco precisa, existe a necessidade, de forma mecanizada, do desbaste da parte inferior da pele (carnaz) através de um rolo de lâminas para o acerto da espessura pretendida.

Com a **neutralização** da pele, ou seja, a eliminação da acidez e consequente ajuste do pH, esta fica apta a receber os tratamentos seguintes. O bicarbonato de sódio é, geralmente, usado neste tratamento.

O **recurtume** tem como finalidade a melhoria da sensação de manuseamento do couro, bem como a resistência ao álcali e à transpiração. Para ganhar um valor de corte mais económico para o cliente é nesta etapa que as propriedades físicas se tornam uniformes. Alguns dos produtos químicos usados são sais minerais, extratos vegetais, taninos sintéticos e resinas.

O processo de **tingimento** é realizado para obter cores consistentes em toda a superfície do couro, bem como através da espessura da pele.

Os couros devem sofrer um **engorduramento** para restabelecer a gordura perdida nos processos anteriores e para atingir as características específicas do produto, como

a resistência e a maciez. Os óleos utilizados podem ser de origem animal, vegetal ou sintética.

De seguida, as peles são sujeitas a um escorrimento e **alisamento** numa máquina para se reduzir a humidade e diminuir as rugas e outras irregularidades, passando então ao processo de secagem.

O objetivo da **secagem** é secar o couro e otimizar a qualidade e o rendimento da área de superfície do produto. As técnicas de secagem utilizadas são a secagem em vácuo e a secagem natural ao ar ou em estufa (Figura 2.4). No fim, resulta uma pele denominada *crust*.

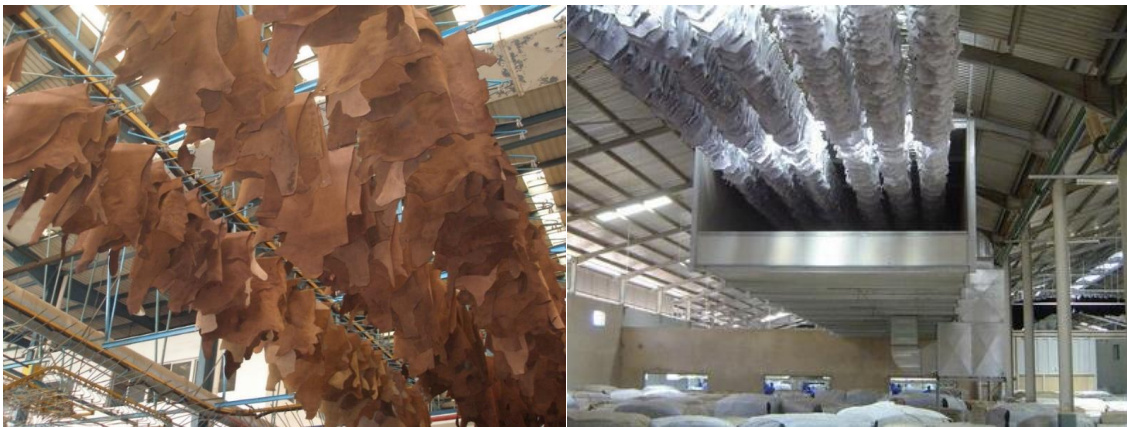


Figura 2.4: Secagem de peles com transportador aéreo às condições ambientais e com estufa, respetivamente

- **Acabamento**

As operações de acabamento têm como objetivo melhorar a aparência do couro e fornecer as características esperadas do produto final, o couro. A cor, o brilho, a adesão e a resistência à fricção são algumas delas, bem como a resistência à água. Geralmente, as operações de acabamento podem ser divididas em processos de acabamento mecânico e de revestimento.

Com as várias operações mecânicas existentes, como o **amaciamento**, a **aparação** e a **prensagem**, a pele ganha o aspeto do artigo final, uma vez que desta etapa resultou a eliminação de defeitos ainda existentes.

Os agentes de superfície são utilizados na etapa de **acabamentos**. São exemplos as ceras, tintas, pigmentos, caseínas, entre outros.

Na fase final deste processo todo, a pele sofre uma **classificação** e **medição** para seguir para a comercialização. (Black et al., 2013; F. Crispim, Gaião, & Silva, 2015)

A Figura 2.5 representa um fluxograma do complexo processo e os inerentes resíduos gerados ao longo das fases do processo de fabrico do couro (Black et al., 2013) (adaptado).

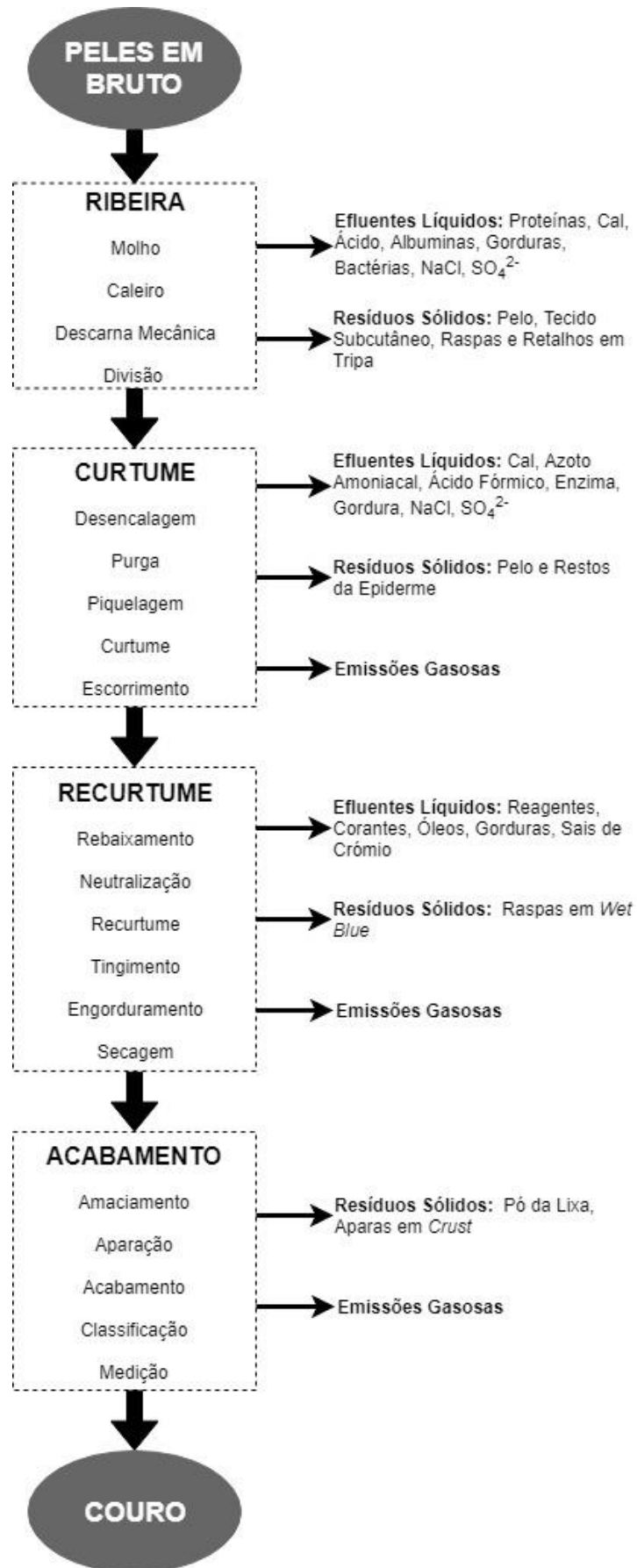


Figura 2.5: Fluxograma do processo de curtumes e os consequentes resíduos gerados

2.2 Impacto Ambiental

Todas as indústrias têm, hoje em dia, uma crescente preocupação com os aspetos ambientais vindos do seu processo laboral e a indústria dos curtumes não é exceção. Esta indústria utiliza um subproduto da indústria das carnes, contribuindo para transformar um resíduo num produto útil e com valor. No entanto, apesar desta contribuição para a resolução dum problema ambiental, o processo da indústria de curtumes não deixa de apresentar um impacto ambiental significativo.

O processo produtivo descrito acima gera elevadas quantidades de águas residuais, resíduos não curtidos e curtidos, lamas do tratamento de efluentes, bem como algum ruído e algumas emissões gasosas. Na Tabela 2.1 está representado um balanço de massa médio com as entradas e saídas do processo produtivo convencional da indústria do couro para o couro bovino salgado. (Black et al., 2013). A Comissão Europeia criou uma lista de resíduos, a Lista Europeia de Resíduos (LER), que agrupam os resíduos resultantes de atividades industriais, urbanas, hospitalares e agrícolas tendo em consideração a origem e composição dos resíduos. A LER em vigor foi publicada pela decisão 2014/955/EU, da Comissão, de 18 de dezembro e, na Tabela 2.2, encontra-se a lista referente aos resíduos gerados pela indústria dos curtumes.

Tabela 2.1: Balanço de massa médio do processo produtivo convencional do couro.

Entrada	Saída		
Pele salgada: 1000 kg	Couro: 200 – 250 kg		
Água: 15 – 50 m ³	Efluentes Líquidos: 15-50 m ³	CQO: 230 – 250 kg CBO: ≈100 kg SS: ≈150 kg Crómio: 5 – 6 kg Sulfureto: ≈10 kg	
Produtos Químicos: ≈500 kg	Resíduos Sólidos: ≈450 – 730 kg	Não Curtidos	Aparas: ≈120 kg Raspas: ≈70 – 350 kg
		Curtidos	Raspas, Aparas e Rebarbas: ≈225 kg
		Tingido/Acabado	Pó (Lixagem): ≈2 kg Aparas: ≈30 kg
Energia: 9,3 – 42 GJ	Lama do Tratamento de Efluentes: ≈500 kg (≈40% de matéria seca)		
	Poluentes Atmosféricos (Solventes Orgânicos): ≈ 1- 10 kg		

Ao analisar o balanço de massa, da Tabela 2.1, pode concluir-se que os pontos críticos desta indústria são um elevado consumo de água gerando também uma

elevada quantidade de água residual com uma carga poluente significativa, e a produção de enormes quantidades de resíduos sólidos.

Como as operações, a que a pele é sujeita, são maioritariamente em fase aquosa, o consumo de água é bastante elevado, pois usa-se esta como solvente para a adição de produtos químicos e para as várias lavagens efetuadas ao longo do processo. Sendo assim, é normal que esta indústria gere uma quantidade bastante significativa de efluentes líquidos com a presença de cal e sulfuretos e pH elevado, grande quantidade de matéria orgânica, elevada salinidade, elevado teor de sólidos em suspensão (fibras, pelos, outros) e a presença de crómio. (Ananias & Pacca, 2009; Morais, 2005)

Tabela 2.2: Código LER para os resíduos da indústria do couro

04	RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO COURO E PRODUTOS DE COURO E DA INDÚSTRIA TÊXTIL
04 01	Resíduos da indústria do couro e produtos de couro
04 01 01	Resíduos das operações de descarna e divisão de tripa
04 01 02	Resíduos da operação de calagem
04 01 03	Resíduos de desengorduramento, contendo solventes em fase aquosa
04 01 04	Resíduos de curtimenta, contendo crómio
04 01 05	Resíduos de curtimenta, sem crómio
04 01 06	Lamas, em especial do tratamento local de efluentes, contendo crómio
04 01 07	Lamas, em especial do tratamento local de efluentes, sem crómio
04 01 08	Resíduos de pele curtida (aparas azuis, surragem poeiras), contendo crómio
04 01 09	Resíduos da confeção e dos acabamentos
04 01 10	Resíduos sem outras especificações

Nas unidades de curtumes verifica-se a formação de odores, resultantes da decomposição da matéria orgânica dos efluentes, bem como a emissão para a atmosfera de alguns poluentes constituídos por amoníaco, gás sulfídrico e subprodutos aminados. A queima de combustível para a geração de vapor, as máquinas de lixagem e as cabines de pintura também contribuem para as emissões gasosas. (Ananias & Pacca, 2009)

Os consumos de energia mais significativos ocorrem na secagem dos couros, no aquecimento de água de processo, bem como, na estação de tratamento de efluentes. (Black et al., 2013)

Os resíduos sólidos são resultantes, maioritariamente, da fase de ribeira e, em quantidades menores, de operações como o rebaixamento, divisão e aparação, bem como das lamas da estação de tratamentos. São exemplos de resíduos não curtidos os pelos, as raspas e aparas em tripa; os resíduos curtidos são as aparas e raspas,

normalmente com crómio; no acabamento existe um resíduo proveniente da lixagem, o pó da lixa, e ainda as aparas *crust* e acabadas. (Ananias & Pacca, 2009; Morais, 2005)

Como a indústria de curtumes está concentrada em Alcanena, existe, neste concelho português, um sistema conjunto para recolha e tratamento de águas residuais e resíduos sólidos industriais, denominado Sistema de Alcanena. As restantes indústrias deste setor, não situadas neste concelho, foram obrigadas a construir uma estação de tratamento de resíduos. Deste modo, muitas pequenas empresas deixaram de operar, nas suas instalações, as fases de ribeira e de curtume, concentrando-se na fase de acabamento, a menos poluente. (AUSTRA, 2017; F. Crispim et al., 2015)

Com a evolução tecnológica e o trabalho de investigação algumas mudanças, umas implementadas, outras ainda não, para a minimização do impacto ambiental provocado pela indústria de curtumes passam, sobretudo, pela contínua gestão e otimização do processo, como por exemplo, a utilização de banhos curtos, a recuperação de energia a partir de correntes (fluidos) do processo, bem como a partir de resíduos de curtumes, a melhoria das técnicas de secagem, entre outras. (F. Crispim et al., 2015)

A procura de alternativas aos produtos químicos usados atualmente, também tem sido objeto de grande investigação, existindo estudos para a substituição do crómio, o agente de curtume mais utilizado, pelo glutaraldeído, titânio ou alumínio. Como o crómio, utilizado no estado de oxidação III apresenta o perigo de passar ao estado de oxidação VI, forma na qual é considerado cancerígeno, o recurso à utilização de sistemas para a sua reciclagem tem sido uma técnica bastante procurada pela indústria. Outro exemplo é a substituição dos sais de amónio, na desencalagem, pelo dióxido de carbono. (Hanna, 1996; Martignone, 1997; Pauckner, 1992)

Quanto ao destino dos resíduos sólidos, estes são, normalmente, depositados em aterros sanitários desde que cumpram os limites legislados, mas ultimamente tem existido um grande investimento científico na procura da valorização destes resíduos, transformando-os em produtos com valor de mercado. Sendo uma fonte de proteína, os resíduos não curtidos podem ser valorizados para a produção de óleos, cola, gelatina e fertilizante. Os resíduos curtidos, depois da recuperação do crómio, são uma fonte de hidrolisado proteico. As lamas geradas no tratamento de efluentes podem ser usadas para a obtenção de biogás. (Ahmed, Idris, & Omar, 2007; Cantera, Goya, & Mingo, 1999; Contreras-Ramos et al., 2004; Sekaran, Swarnalatha, & Srinivasulu, 2007; Tamilchelvan & Dhinakaran, 2012)

2.3 Raspa Tripa e Raspa Verde

A fase de ribeira, do processo de curtume, é uma fase importante enquanto geradora de resíduos. Se a descarna mecânica for feita antes do molho após um pré-molho, a descarna verde, gera um resíduo sólido denominado raspa verde. Caso ocorra depois do caleiro, gera a raspa tripa. Ambas as raspas são consideradas resíduos não curtidos, pois são gerados antes do curtume.

Tradicionalmente as empresas de curtume preferem a descarna depois do caleiro, uma vez que a pele apresenta-se mais intumescida permitindo, deste modo, que o tecido conjuntivo e a gordura sejam facilmente removidos. Entre 10 a 40% do peso da pele são removidos como raspa. O resíduo gerado em maiores quantidades é a raspa tripa em detrimento da raspa verde. Em Portugal, é gerada uma quantidade média diária de 30 toneladas de raspa, sendo estimado que cerca de 25% corresponde a raspa verde e o restante a raspa tripa.

Como a raspa tripa é proveniente de uma pele sujeita a altos teores de cal e sulfuretos, na etapa de caleiro, estes podem inviabilizar a valorização do resíduo, havendo a necessidade de criar processos para a remoção destas substâncias químicas. A raspa verde é gerada de uma pele que foi submetida a um remolho, logo não sendo sujeita a produtos químicos, é mais fácil a sua valorização. (Black et al., 2013; F. Crispim et al., 2015)

De acordo com o artigo 10º do Regulamento (CE) n.º 1069/2009 de 21 de outubro, a raspa é classificada como um subproduto incluído nas matérias de categoria 3 e, segundo o 14º artigo, esta deve ser valorizada ou eliminada.

2.3.1 Valorização da Raspa

Como referido anteriormente, a indústria de curtumes gera grandes quantidades de raspa diariamente e, para contrariar esse facto, tem-se apostado na procura de soluções para um possível tratamento e valorização destes resíduos sólidos, transformando-os num subproduto da indústria de curtumes que, normalmente são depositados em aterro.

Um dos processos para produzir gordura através das raspas, tripa e verde, é a hidrólise, processo esse que tem sido bastante estudado e com resultados satisfatórios para a valorização destes resíduos gerados. O tratamento da raspa a

partir da hidrólise térmica precisa de elevadas temperaturas, ao contrário do processo com tratamento enzimático que requer temperaturas mais baixas e tempos de ensaio mais curtos. (Bragança et al., 2013)

Do processo da hidrólise da raspa resultam três fases: uma fase sólida superior, constituída pela gordura; uma fase intermédia, constituída pelo hidrolisado proteico líquido; e a fase inferior, constituída pelo resíduo sólido. (Bragança et al., 2013)

Estudos efetuados até ao momento apontam a utilização das raspas como fertilizante, através da prévia compostagem. Esta compostagem dá-se com a decomposição biológica, tanto anaeróbia como aeróbia, dos resíduos sólidos por ação dos microrganismos. Daqui resulta um composto usado como fertilizante ou biogás. O biogás pode ser queimado para produzir energia. (Black et al., 2013; F. Crispim et al., 2015; Pauckner, 1992; Sekaran et al., 2007; Tamilchelvan & Dhinakaran, 2012)

Outra possível valorização deste subproduto é sua utilização para a produção de biodiesel, usando a gordura extraída das raspas. (Black et al., 2013; F. Crispim et al., 2015; Getahun & Gabiyye, 2013; Kolomaznik et al., 2012; Math, Kumar, & Chetty, 2010)

2.3.2 Gordura

A gordura pertence à classe dos lípidos e estruturalmente é constituída por três moléculas de ácidos gordos e uma de glicerol. Esses ácidos gordos são formados por cadeias lineares, que podem ser saturadas, monoinsaturadas ou polinsaturadas, sendo que o comprimento das cadeias de carbono varia entre 4 e 24 átomos de carbono, representadas simbolicamente por C – n:p, em que n representa o número de átomos de carbono na cadeia e p o número de ligações duplas. Na Tabela 2.3 estão representados os valores de referência dos ácidos gordos na composição do sebo de bovino. (Firestone, 1999; Mirante, 2007)

Tabela 2.3: Valores de referência de ácidos gordos na composição do sebo de bovino

Ácidos Gordos	Estrutura	Valores de Referência (%)
Ácido Mirístico	C14:0	1,0 – 6,0
Ácido Palmítico	C16:0	20,0 – 37,0
Ácido Palmitoleico	C16:1	1,0 – 9,0
Ácido Margárico	C17:0	1,0 – 3,0
Ácido Esteárico	C18:0	25,0 – 40,0
Ácido Oleico	C18:1	31,0 – 50,0
Ácido Linoleico	C18:2	1,0 – 5,0

Normalmente, à temperatura ambiente, a gordura é sólida e as suas propriedades são determinadas pela sua composição em ácidos gordos e pelo grau de insaturação dos mesmos.

A composição química das gorduras é resultado de vários fatores, como por exemplo, uma gordura de origem animal é afetada pelas condições climáticas a que o animal, que lhe deu origem, esteve sujeito, bem como a sua maturidade e estado de saúde, o tipo de alimentação, entre outros fatores. (Mirante, 2007)

Nas gorduras são avaliados parâmetros como a humidade, o índice de acidez, o índice de insaponificação, o índice de iodo e o teor de enxofre. Na Tabela 2.4 estão discriminados os valores de referência, para os parâmetros mencionados, para a gordura animal de acordo com o Regulamento (CE) n.º 1069/2009 de 21 de outubro de 2009.

Tabela 2.4: Valores de referência para a gordura animal

Parâmetro	Valores de Referência
Humidade (%)	Máx. 0,50
Índice de Acidez (%)	Máx. 20,0
Índice de Insaponificação (%)	Máx. 2,0
Número de Iodo (g iodo/100 g de amostra)	Máx. 120
Teor de Enxofre (ppm)	Máx. 100

2. ESTADO DE ARTE

3. Material e Métodos

Neste capítulo são descritas as metodologias experimentais utilizadas nos ensaios realizados ao longo deste trabalho, começando pelas caracterizações das raspa estudadas e pela obtenção de gordura a partir destas. Por último, a caracterização da gordura obtida. A raspa verde, que serviu como amostra para os ensaios realizados, foi proveniente da empresa Couro Azul e a raspa tripa foi oriunda da empresa Curtumes Boaventura.

3.1 Caracterização da Raspa

As raspa de bovino, raspa verde e raspa tripa, foram caracterizadas quanto aos seguintes parâmetros: humidade, sólidos totais, matéria mineral e orgânica e teor de gordura. Os procedimentos estão disponíveis no anexo A (A.1 a A.4). A Figura 3.1 mostra os aspetos das raspa analisadas: a raspa verde e a raspa tripa, respetivamente. Para cada parâmetro estudado foram feitas várias réplicas, cujos valores médios estão discriminados no capítulo seguinte.



Figura 3.1: Aspetos da raspa verde, à direita, e da raspa tripa, à esquerda

3.2 Obtenção de Gordura

A gordura foi obtida através da realização de hidrólises enzimáticas e térmicas das rasps. Na hidrólise enzimática foi analisado o efeito da quantidade de enzima Protabate P e do tempo na hidrólise da raspa verde. A enzima Protabate P é uma protease, fabricada para a indústria dos curtumes, ativa para pH entre 7,5 e 8,5. Pela razão deste valor de pH ser característico da raspa verde, esta enzima só foi aplicada nesta raspa, uma vez que a raspa tripa tem valores de pH superiores.

Para comparar os diferentes processos de obtenção de gordura foi necessário o cálculo do rendimento de extração da mesma (Equação 3.1), representando este a razão entre a quantidade de gordura seca extraída e a quantidade de amostra de raspa de bovino usada no respetivo ensaio.

$$\eta_{\text{extração de gordura}} (\%) = \frac{m_{\text{gordura seca extraída}}}{m_{\text{amostra}}} \times 100 \quad (3.1)$$

De maneira a que o rendimento de extração de gordura não inclua a presença de humidade na amostra, foi calculado o rendimento de extração de gordura em base seca (Equação 3.2), que consiste no quociente entre a massa de gordura seca extraída nos ensaios e a massa de raspa seca.

$$\eta_{\text{base seca}} (\%) = \frac{m_{\text{gordura seca extraída}}}{m_{\text{amostra seca}}} \times 100 \quad (3.2)$$

Procedimento para a hidrólise térmica das rasps:

Em balões de vidros de 1000 mL foram colocados 500 g de raspa. Os balões foram colocados numa manta de aquecimento durante 4 horas a uma temperatura em torno de 100 °C . No final da hidrólise, deixou-se a mistura arrefecer e decantar até ao dia seguinte para a separação das três fases.

Procedimento para a hidrólise enzimática da raspa verde:

Em frascos de Schott de 500 mL foram colocados 120 g de raspa verde, 60 mL de água e diferentes quantidades de enzima, 5% ou 10% (percentagem relativamente à massa de raspa verde utilizada). Os frascos foram colocados num banho termostático à temperatura fixa de 40 °C. O tempo de ensaio foi de 60 ou 120 minutos. Na Tabela 3.1 estão representados os ensaios efetuados com as diferentes variações de percentagem de enzima e de tempo.

Tabela 3.1: Ensaios realizados da hidrólise enzimática da raspa verde

Ensaios	Água (%)¹	Enzima (%)¹	Tempo (h)	Temperatura (°C)
1	50	5	1	40
2	50	10	1	40
3	50	5	2	40
4	50	10	2	40

¹ % baseada na massa de amostra

Depois de terminados os ensaios, os frascos foram sujeitos a um banho termostático durante 1 hora e à temperatura de 85 °C para inativação da enzima e para uma hidrólise complementar. No final da hidrólise, deixou-se a mistura arrefecer e decantar até ao dia seguinte para a separação das três fases.

3.3 Caracterização da Gordura

As gorduras provenientes das raspas, verde e tripa, foram caracterizadas em diferentes parâmetros tais como a humidade, o índice de acidez, segundo a norma ISO 660:2009; o número de iodo, cumprindo a norma ISO 3961:1996; o índice de insaponificação, segundo a norma ISO 18609:2004; e o teor de enxofre através de análises de fluorescência de Raios X. Os procedimentos estão disponíveis no anexo A (A.1 e de A.5 a A.7). Para cada parâmetro estudado foram feitas várias réplicas, cujos valores médios estão discriminados no capítulo seguinte.

3. MATERIAL E MÉTODOS

4. Resultados e Discussão

A análise e a discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo deste trabalho estão representados neste capítulo.

Primeiramente são apresentados os resultados da caracterização das diferentes raspas. De seguida, são revelados os resultados da obtenção de gordura por parte das raspas, analisando o efeito das diferentes variantes. Por último, são revelados e discutidos os resultados da caracterização das gorduras com diferentes proveniências.

4.1 Caracterização da Rasma

A raspa verde e a raspa tripa de bovino foram caracterizadas quanto à humidade, sólidos totais, matéria mineral, matéria orgânica e teor de gordura. Os resultados das análises aos parâmetros mencionados estão presentes na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Resultados da caracterização da raspa verde e da raspa tripa de bovino

Parâmetro	Raspa Verde	Raspa Tripa
Humidade (%)	24,39	79,42
Sólidos Totais (%)	75,61	20,58
Matéria Mineral (% base seca)	0,02	0,64
Matéria Orgânica (% base seca)	99,98	99,36
Teor de Gordura (% base seca)	45,19	31,60

Segundo o estudo de (A. Crispim et al., 2010) os valores obtidos na caracterização da raspa tripa de bovino encontram-se dentro do expectável. Relativamente à raspa verde o mesmo não se confirma, uma vez que, para além de não existirem fontes comparáveis, o teor de humidade é muito baixo em comparação com os valores obtidos com a raspa tripa. Tendo em conta a origem das amostras, era esperado que os valores da caracterização de ambas as raspas fossem semelhantes. Para além do mais, deve ter-se em conta que a amostra é bastante heterogénea.

4.2 Obtenção de Gordura

Para se obter gordura a partir das amostras de raspa, procedeu-se a tratamentos de hidrólise enzimática e térmica conforme referido anteriormente. A Figura 4.1 mostra o aspeto da gordura obtida através da hidrólise térmica da raspa verde de bovino.



Figura 4.1: Gordura proveniente da raspa verde depois da hidrólise térmica

4.2.1 Hidrólise Enzimática

Na hidrólise enzimática da raspa verde foi estudado o efeito da quantidade de enzima e do tempo. Na Tabela 4.2 estão representados os resultados dos ensaios aplicados à raspa verde.

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios realizados da hidrólise enzimática da raspa verde

Ensaio	Água (%) ¹	Enzima (%) ¹	Tempo (h)	Temperatura (°C)	$\eta_{\text{extração}}$ (%)	$\eta_{\text{base seca}}$ (%)
1	50	5	1	40	38,64	50,79
2	50	10	1	40	32,28	42,43
3	50	5	2	40	38,28	50,32
4	50	10	2	40	33,27	43,38

¹ % baseada na massa de amostra

Analisando os dados da Tabela 4.2, e tendo em conta que não existem resultados comparáveis na literatura, verifica-se que para a mesma quantidade de enzima os

rendimentos de extração são semelhantes independentemente do tempo. Conclui-se, também, que com o aumento de percentagem de enzima o rendimento da hidrólise diminui. Uma das possíveis justificações para esta última conclusão pode ter a ver com uma hidrólise mais acentuada da parte proteica que contribuiu para emulsionar alguma gordura.

4.2.2 Hidrólise Térmica

A hidrólise térmica foi aplicada às duas amostras, raspa verde e raspa tripa, sendo apresentados na Tabela 4.3 os respetivos rendimentos.

Tabela 4.3: Resultados da hidrólise térmica às raspas de bovino

Amostra	$\eta_{\text{extração}}$ (%)	$\eta_{\text{base seca}}$ (%)
Raspa Verde	43,70	57,45
Raspa Tripa	47,77	----

Depois de feita hidrólise térmica à amostra concluiu-se que o método é viável para a extração de gordura, uma vez que o rendimento de extração para ambas as raspas foi semelhante. O rendimento, em base seca, da hidrólise da raspa tripa ultrapassou 100% motivo pelo qual não é apresentado. Tal situação pode ser justificada pela heterogeneidade da amostra.

4.3 Caracterização da Gordura

Depois de obtida a gordura através das raspas de bovino, foi necessário proceder à análise de alguns parâmetros como a humidade, o índice de acidez, o índice de insaponificação, o índice de iodo e o teor de enxofre das gorduras, no sentido de avaliar se as gorduras estão dentro dos valores de referência. A Tabela 4.4 mostra os resultados dos ensaios realizados aos parâmetros mencionados.

Tabela 4.4: Resultados dos parâmetros analisados das gorduras proveniente das raspas

Parâmetro	Gordura proveniente da Raspa Verde	Gordura proveniente da Raspa Tripa
Humidade (%)	0,61	1,12
Índice de Acidez (%)	5,34	0,48
Índice de Insaponificação (%)	< 0,2	< 0,3
Índice de Iodo (g iodo/100 g de amostra)	59,44	20,78
Teor de Enxofre (ppm)	76	665

Comparando os valores de referência da Tabela 2.4 com os resultados da Tabela 4.4, pode-se concluir que, para a gordura proveniente da raspa verde, os parâmetros estão dentro dos limites das especificações da gordura animal, exceto o teor de humidade que se encontra um pouco acima do valor de referência.

Quanto à gordura proveniente da raspa tripa, o resultado do teor de enxofre foi de 665 ppm, superando o valor de referência que especifica o máximo de 100 ppm para a gordura animal. O teor de humidade também apresenta um valor elevado, uma vez que o máximo especificado é de 0,50. Os restantes parâmetros encontram-se dentro dos limites das especificações para a gordura animal.

5. Proposta de Instalação

Neste capítulo vão ser apresentadas duas alternativas de uma proposta de instalação para a produção de gordura a partir das raspa verde e tripa de bovino: uma correspondente a um regime de funcionamento descontínuo e outra a um regime de funcionamento contínuo. Cada alternativa irá ter representados esquemas ilustrativos com o intuito de proporcionar uma noção global de cada processo.

Em Portugal produzem-se cerca de 30 toneladas diárias de raspa para aterro, sendo que 25% correspondem à raspa verde e os restantes à raspa tripa e é com base nesta premissa que se vão fazer os cálculos desenvolvidos ao longo deste capítulo.

5.1 Regime Descontínuo

A primeira alternativa funcionará em regime descontínuo, sendo constituída por um triturador que fará a trituração das raspa de maneira a facilitar a sua digestão no reator de digestão, o equipamento seguinte. Este reator será encamisado e isolado termicamente e terá um sistema de agitação. De seguida encontra-se um decantador de sólidos, que irá fazer a separação dos resíduos sólidos que não foram digeridos na digestão da raspa. Outro decantador posterior irá separar as duas fases líquidas resultantes, o hidrolisado proteico e a gordura. De salientar que toda a tubagem de transporte, entre equipamentos e os decantadores, deverá ter aquecimento associado, uma vez que a gordura pode solidificar à temperatura ambiente. Na Figura 5.1 está representado um esquema com os equipamentos necessários a este regime.

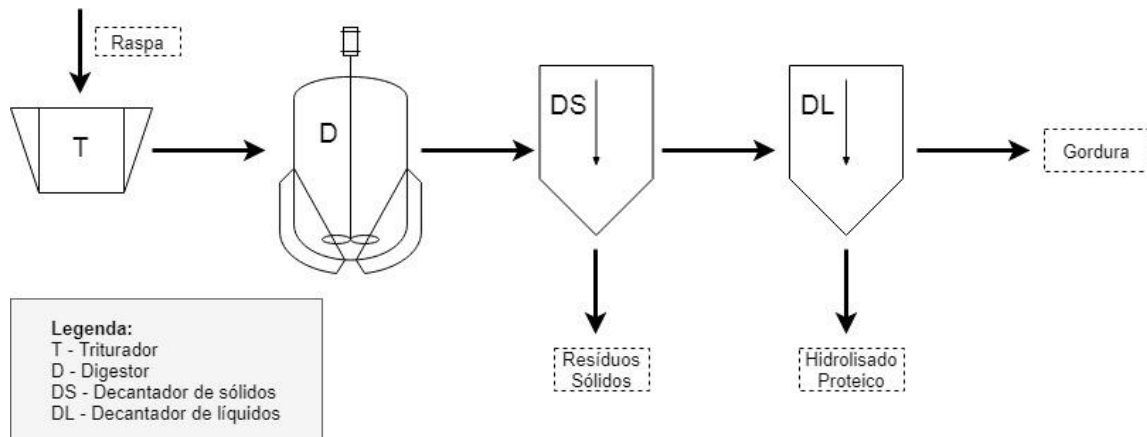


Figura 5.1: Esquema representativo do regime descontínuo

5.1.1 Balanços de Massa

A partir dos resultados dos ensaios de hidrólise térmica das raspas apresentados no capítulo 4, procedeu-se aos cálculos dos balanços de massa, tendo em conta a premissa de que em Portugal são gerados 30 toneladas diárias de raspa de bovino dos quais se estima que 25% represente raspa verde e 75% represente raspa tripa.

Como resultado do trabalho experimental, o rendimento da hidrólise térmica da raspa verde é de 43,70%. Assim, para um total de 7,5 toneladas diárias de raspa verde (25% do valor global da raspa), pode-se produzir cerca de 3 toneladas diárias de gordura, conforme apresentado na Figura 5.2.

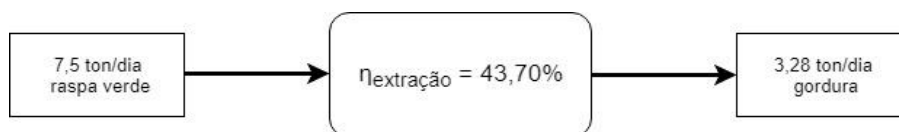


Figura 5.2: Produção diária de gordura proveniente da raspa verde

O rendimento da hidrólise térmica da raspa tripa, obtido através do resultado do trabalho experimental, é de 47,77%. Assim, para um total de 22,5 toneladas diárias de raspa tripa (75% do valor global da raspa), pode-se produzir cerca de 11 toneladas de gordura diariamente, conforme se apresenta na Figura 5.3.

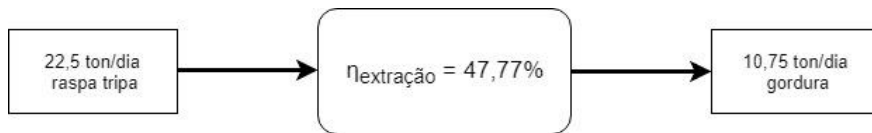


Figura 5.3: Produção diária de gordura proveniente da raspa tripa

Em conclusão, estima-se que a produção diária de gordura a partir destes subprodutos seja cerca de 14 toneladas.

5.1.2 Dimensionamento do Reator

Sabendo que existem 30 000 kg de raspa diária para tratar, que a unidade vai laborar 9 horas por dia, e o tempo de digestão é de 2 horas, um reator poderá fazer duas cargas, implicando a existência de 2 reatores. Daqui resulta que cada reator tem de ser dimensionado para 7500 kg de raspa.

Cada reator, a ser dimensionado, vai ter forma cilíndrica vertical e será encamisado de forma a garantir o aquecimento através de vapor de água. Por motivos de segurança para os trabalhadores, o reator terá um isolamento térmico de lã de rocha que, por sua vez, será revestido com folha de alumínio.

Para uma massa específica da raspa igual a 1020 kg/m^3 , determina-se o volume ocupado pela raspa no reator (V_{\min}) de acordo com a equação 5.1.

$$V_{\min} = \frac{m}{\rho_{\text{raspa}}} = \frac{7500}{1020} = 7,35 \text{ m}^3 \quad (5.1)$$

Assim, assumindo uma margem de cerca de 20% para variações de volume depois da digestão ou eventuais oscilações na produção e para salvaguardar o espaço ocupado pelo sistema de agitação, o reator deverá ter um volume útil (V_{reator}) de 9 m^3 .

Para determinar as dimensões do reator teve-se em conta uma relação entre a altura (h) e o diâmetro (d) do reator igual a 3, e assumiu-se ainda que reator é cilíndrico com fundo plano para o cálculo do volume útil do mesmo. Na Tabela 5.1 estão discriminadas as dimensões do reator necessárias para os futuros cálculos deste capítulo. De referir que A_{topo} refere-se à área de topo circular do reator e A_{lat} à área lateral curva do reator.

Tabela 5.1: Dimensões do reator em regime descontínuo

$V_{\text{reator}} \text{ (m}^3\text{)}$	9
$h \text{ (m)}$	4,68
$d_i \text{ (m)}$	1,56
$A_{\text{topo}} \text{ (m}^2\text{)}$	1,91
$A_{\text{lat}} \text{ (m}^2\text{)}$	22,64

O material escolhido para o reator é o aço inox que terá uma espessura de 10 mm. (Sinnott, 2005)

Segundo (Sinnott, 2005), a espessura da camisa de aquecimento pode variar entre 50 mm para reatores pequenos e 300 mm para reatores grandes. Como o reator dimensionado é de médias dimensões, considerou-se uma espessura de 75 mm. Sendo assim, o equipamento irá ter um diâmetro externo (d_e) de 1,73 metros.

5.1.3 Balanços de Energia

No que respeita às necessidades energéticas o reator precisa de vapor para o aquecimento e de energia elétrica para a agitação. Assume-se que o vapor existente (T_v) está a 3 bar e 130 °C. A temperatura do ar ambiente (T_∞) é 15 °C e dentro do reator (T_r) é 95 °C. A temperatura da superfície externa do reator é 45 °C de modo a não representar perigo para os trabalhadores.

A energia térmica total necessária (q) resulta do balanço de energia aplicado ao reator representado pela equação 5.2, correspondente a um balanço global em estado não estacionário.

$$\Delta U = m_e H_e - m_s H_s + q - q_{\text{perdas}} \quad (5.2)$$

Nesta equação, ΔU representa a variação da energia interna no reator que é igual à energia interna final menos a energia interna inicial, aproximadamente igual à entalpia final menos a entalpia inicial. Assumindo um estado de referência igual à temperatura inicial, resulta que $H_i = 0$ então $\Delta U = m_f H_f$.

Não existindo entradas ou saídas no reator, a equação 5.2 fica:

$$q = m_f H_f + q_{perdas}$$

$$q = m_f \cdot c_p \text{ raspa} \cdot (T_f - T_{ref}) + m_{raspa} \cdot \Delta H_{reação} + q_{perdas}$$

Quanto ao calor de reação ($\Delta H_{reação}$), uma vez que não existe literatura e experiência laboratorial para o suportar, vai-se assumir que o valor é nulo. Para a temperatura de referência considera-se a temperatura ambiente e a temperatura de saída corresponde à temperatura da reação dentro do reator. Assume-se também que a mistura final tem o mesmo c_p médio da raspa inicial. Segundo (Kanagy, 1955) $c_p \text{ raspa} = 1,42 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$. Sendo assim ter-se-á a equação 5.3:

$$q = m_f \cdot c_p \text{ raspa} \cdot (T_f - T_i) + q_{perdas} \cdot t \quad (5.3)$$

Para o cálculo das perdas de calor (q_{perdas}) deve ter-se em conta as perdas por convecção tanto no topo circular do reator, bem como pela superfície lateral, e as perdas por radiação, em ambas as superfícies, representados na equação 5.4.

$$q_{perdas} = q_{conv} + q_{rad} \quad (5.4)$$

A equação anterior desenvolvida fica:

$$q_{perdas} = h_{lat} \cdot A_{lat} \cdot (T_p - T_\infty) + h_{topo} \cdot A_{topo} \cdot (T_p - T_\infty) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (A_{lat} + A_{topo}) \cdot (T_p - T_\infty)^4$$

em que:

A_{lat} / A_{topo}	Áreas de superfície de transferência de calor (m^2)
h_{lat} / h_{topo}	Coefficientes de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$)
T_p	Temperatura da parede externa do isolamento ($^\circ\text{C}$)
T_∞	Temperatura do fluido envolvente ($^\circ\text{C}$)
ε	Emissividade da superfície
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$)

Para efeitos de cálculo assume-se que a temperatura da vizinhança e a temperatura do fluido envolvente são, aproximadamente, iguais. A emissividade do aço inox é 0,60. (Cengel, 2014)

✓ **Cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção**

Em condições de convecção natural, o coeficiente médio de transferência de calor pode ser calculado por algumas correlações simplificadas, tendo em conta as propriedades físicas à temperatura média do filme (Geankoplis, 1993).

Neste caso de estudo, a temperatura média do filme é de 30 °C, uma vez que, e de acordo com os pressupostos apresentados anteriormente, a temperatura do ar ambiente é 15 °C e da parede externa do isolamento é 45 °C. As propriedades físicas do ar a 30 °C e necessárias para o cálculo dos coeficientes encontram-se na Tabela 5.2 (Cengel, 2014).

Tabela 5.2: Propriedades físicas do ar a 30 °C

ρ (kg/m ³)	1,164
c_p (J/kg K)	1007
k (W/m K)	0,02588
μ (kg/m s)	$1,872 \times 10^{-5}$
Pr	0,7282

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície de topo do reator (h_{topo}), assume-se que esta é uma placa horizontal com a superfície superior arrefecida e a superfície inferior aquecida e é calculado pela equação 5.5. (Geankoplis, 1993)

$$h_{topo} = 0,59 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (5.5)$$

Para se usar a respetiva correlação, o produto do número de Grashof (Gr) pelo número de Prandtl (Pr) deve situar-se entre 3×10^5 e 3×10^{10} .

O número de Grashof (Gr) é calculado pela equação 5.6:

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (5.6)$$

em que:

L	Igual a $0,9d_i$ (por ser uma placa circular) (m)
g	Aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$)
ΔT	Diferença positiva de temperaturas entre o fluido e a parede ($^{\circ}\text{C}$)
β	Coefficiente de expansão volumétrica (K^{-1})

Para gases, o coeficiente de expansão volumétrica é igual ao inverso da temperatura do fluido (em Kelvin).

Na Tabela 5.3 estão os resultados necessários para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície de topo.

Tabela 5.3: Cálculo do h_{topo}

Gr	$1,0 \times 10^{10}$
Gr . Pr	$7,3 \times 10^9$
h_{topo} ($\text{W/m}^2 \text{K}$)	1,23

O cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície lateral do reator (h_{lat}) segue o mesmo método de cálculo do coeficiente anterior, apenas mudando a geometria, sendo que se trata de uma placa/tubo vertical, em que L representa a altura da placa/tubo. O coeficiente de convecção é calculado pela equação 5.7, caso a grandeza do produto do número de Grashof (Gr) pelo número de Prandtl (Pr) seja superior a 10^9 . (Geankoplis, 1993)

$$h_{\text{lat}} = 1,24 (\Delta T)^{1/3} \quad (5.7)$$

Na Tabela 5.4 estão apresentados os resultados necessários para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície lateral do reator.

Tabela 5.4: Cálculo do h_{lat}

Gr	$3,8 \times 10^{11}$
Gr . Pr	$2,8 \times 10^{11}$
h_{lat} (W/m ² K)	3,86

Voltando ao balanço de energia representado na equação 5.2, sendo a hidrólise da raspa uma reação biológica, entendeu-se desprezar o calor de reação ($\Delta H_{reação}$), uma vez que não existe literatura e experiência laboratorial para o suportar.

Na tabela 5.5 estão representados os valores necessários para o cálculo do balanço de energia da equação 5.3.

Tabela 5.5: Balanço de energia ao reator

q_{perdas} (kW)	5,72
$q_{médio}$ (kW)	124,05

Com a potência térmica total necessária para que se dê a reação, é possível calcular o caudal de vapor médio necessário (\dot{m}_v) para o sistema através da equação 5.8. A entalpia de evaporação do vapor de água saturado a 130 °C é de 2173,6 kJ/kg. (Geankoplis, 1993)

$$q = \dot{m}_v \times \lambda \quad (5.8)$$

Sendo assim, o caudal de vapor necessário (\dot{m}_v) para aquecer a raspa no reator será de 0,06 kg/s.

Para o cálculo da espessura do isolamento térmico é necessário ter em conta que a transmissão de calor ocorre através do vapor, a 130 °C, que transmite calor por convecção à superfície interna da camisa de aquecimento. O calor é daí propagado por condução ao longo do isolamento até à superfície externa do isolamento e, novamente, por convecção e radiação, transmitido ao ar atmosférico. É necessário então, fazer um balanço de energia entre a superfície externa da camisa de aquecimento e a superfície externa do isolamento. De lembrar que o isolamento é de lã rocha e está revestido por uma folha de alumínio. A equação 5.9 representa o balanço de energia enunciado.

$$q_{cond} = q_{conv} + q_{rad} \quad (5.9)$$

A equação anterior desenvolvida fica:

$$\frac{T_v - T_p}{\frac{\Delta r}{kA_{ml}}} = h_{lat} \pi D_e L (T_p - T_\infty) + \varepsilon \sigma \pi D_e L (T_p - T_\infty)^4$$

em que:

- k Condutividade térmica do isolamento (W/m K)
- A_{ml} Área média logarítmica entre a superfície interna do isolamento em contacto com o vapor e a superfície externa em contacto com o ar atmosférico (m²)
- Δr Diferença entre o raio externo e o raio interno do isolamento (m)
- D_e Diâmetro externo do reator com o revestimento (m)

A condutividade térmica da lã de rocha é de 0,029 W/m K (Geankoplis, 1993) e a emissividade da folha de alumínio da folha de alumínio é de 0,05. (Cengel, 2014)

Depois de substituídas todas as incógnitas na equação 5.9 obtém-se um isolamento em lã de rocha para este reator com espessura de 2 cm. Assim o diâmetro externo do reator com isolamento (D_e) é de 1,77 m.

5.1.4 Sistema de Agitação

Como a raspa de bovino é muito viscosa, assumindo uma viscosidade de 1000 kg/m s, o sistema de agitação será em forma de dupla hélice, representado na Figura 5.4 (Geankoplis, 1993)

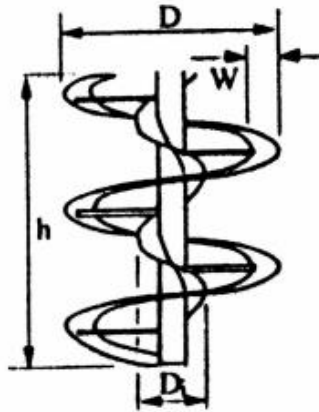


Figura 5.4: Sistema de agitação em dupla hélice

Para o dimensionamento do sistema de agitação existem algumas relações a ter em conta acerca do tipo de agitação escolhido, nomeadamente que a relação entre o diâmetro do agitador (D_a) e o diâmetro do reator (d_i) seja 0,95 e que a relação da largura da pá da hélice (W) e o diâmetro do reator seja 0,095. Sendo assim, é necessário calcular o número de Reynolds (Re) através da equação 5.10.

$$Re = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \quad (5.10)$$

Em que N é a velocidade rotacional, em rev/s.

Caso o número de Reynolds seja inferior a 20 e, como se trata de um agitador em dupla hélice, o número da potência (N_p) é calculado através da equação 5.11.

$$N_p = 186 (Re)^{-1} \quad (5.11)$$

Para o cálculo da Potência (P), em W, utiliza-se a equação 5.12.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_a^5} \quad (5.12)$$

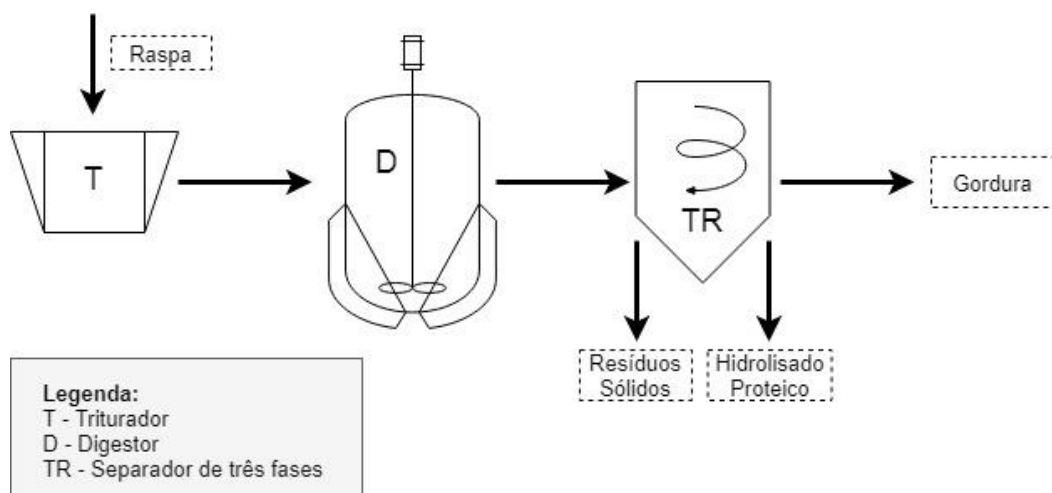
Na Tabela 5.6 encontram-se as características do agitador em dupla hélice necessário para o regime descontínuo em que N foi estimado.

Tabela 5.6: Características do agitador em dupla hélice

D_a (m)	1,48
W (m)	0,15
N (rev/s)	0,1
Re	1,49
N_p	124,83
P (kW)	6,03

5.2 Regime Contínuo

A segunda alternativa funcionará em regime contínuo, sendo constituída por um triturador para triturar as raspas de maneira a facilitar a sua digestão no digestor, o equipamento seguinte. Este digestor será encamisado e termicamente isolado e terá um sistema de agitação. O controlo de odores neste equipamento é essencial, uma vez que o cozimento das raspas provoca libertação de cheiros fortes que se podem dispersar pelo ar. De seguida encontra-se um separador de três fases que irá fazer a separação das fases remanescentes da digestão: os resíduos sólidos que não foram digeridos na digestão da raspa e as duas fases líquidas resultantes, o hidrolisado proteico e a gordura. De salientar que toda a tubagem de transporte entre equipamentos e os decantadores terão de ter aquecimento associado, uma vez que a gordura pode solidificar à temperatura ambiente. Na Figura 5.5 está representado um esquema com os equipamentos necessários a este regime.

**Figura 5.5:** Esquema representativo do regime contínuo

5.2.1 Balanços de Massa

O reator de digestão da raspa funcionará em regime contínuo e tratará a raspa verde seguida da raspa tripa. Assumindo o mesmo tempo de residência para os dois tipos de raspa, ter-se-á 30 toneladas a tratar diariamente. Desta massa total de raspa, 7,5 toneladas correspondem à raspa verde e 22,5 toneladas correspondem à raspa tripa, o que dá uma alimentação de 3750 kg/h, para um período de 8 horas de laboração. Nessa base, produzir-se-á cerca de 1750 kg/h de gordura.

5.2.2 Dimensionamento do Reator

A quantidade de raspa a tratar, por dia, é de 30 000 kg, perfazendo um tratamento, por hora, de 3 750 kg. O tempo de residência é de 2 horas assumindo-se que o tempo é suficiente para o aquecimento e que a hidrólise da raspa se vai verificando ao longo do reator com o aumento da temperatura. Para o cálculo do volume mínimo do reator é necessário calcular o caudal volumétrico (Q_v), através da equação 5.13. Na equação 5.14 é calculado o volume mínimo do reator.

$$Q_v = \frac{m_{raspa}}{\rho_{raspa}} = \frac{3750}{1020} = 3,68 \text{ m}^3 / h \quad (5.13)$$

$$t = \frac{V_{min}}{Q_v} \Leftrightarrow V_{min} = 3,68 \times 2 = 7,36 \text{ m}^3 \quad (5.14)$$

De igual forma ao regime descontínuo, assume-se uma margem de cerca de 20% para variações de volume depois da digestão ou eventuais oscilações na produção e para salvaguardar o espaço ocupado pelo sistema de agitação. O reator deverá ter um volume útil (V_{reator}) de 9 m³.

Como se trata de um reator horizontal, teve-se em conta uma relação entre o comprimento (L_{reator}) e o diâmetro (d_i) do reator igual a 5. Assumiu-se que reator é cilíndrico o cálculo do volume útil do mesmo. Na Tabela 5.7 estão discriminadas as dimensões do reator necessárias para os futuros cálculos deste capítulo. De referir que A_{lat} é a área lateral curva do reator. Para efeitos de cálculo a área de superfície

plana é desprezada, visto ser um valor pequeno em comparação com a área lateral curva.

Tabela 5.7: Dimensões do reator em regime contínuo

$V_{\text{reator}} \text{ (m}^3\text{)}$	9
$L_{\text{reator}} \text{ (m)}$	6,60
$d_i \text{ (m)}$	1,32
$A_{\text{lat}} \text{ (m}^2\text{)}$	33,18

De igual maneira ao regime anterior, o regime descontínuo, o material escolhido para o regime contínuo também vai ser o aço inox com espessura de 10 mm e a camisa de aquecimento terá, igualmente, uma espessura de 75 mm. Daqui resulta um diâmetro externo (d_e) de 1,49 metros. (Sinnott, 2005)

5.2.3 Balanços de Energia

Este regime irá funcionar nas mesmas condições do que o anterior, ou seja, o vapor fornecido pela rede está a 3 bar e 130 °C, a temperatura do ar ambiente é 15 °C e dentro do reator é 95 °C e, de maneira a não representar perigo aos trabalhadores, a temperatura à superfície do reator é 45 °C.

Para o cálculo do balanço de energia ao reator usa-se a equação 5.15.

$$q = H_s - H_e + |q_{\text{perdas}}| \quad (5.15)$$

Em que H_s e H_e , em kW, representam as entalpias de saída e entrada, respetivamente, da mistura.

Assumindo que a mistura de saída tem o mesmo c_p médio da raspa à entrada, o cálculo da entalpia de saída está representado na equação 5.16. Assume-se, também, que o estado de referência é a entrada do reator, sendo que a entalpia à entrada do reator é nula.

$$H_s = m_{\text{raspa}} \cdot c_{p\text{raspa}} \cdot (T_s - T_e) \quad (5.16)$$

5. PROPOSTA DE INSTALAÇÃO

Para o cálculo das perdas de calor deve ter-se em conta as perdas por convecção e radiação pela superfície curva do reator e as perdas por radiação, representadas na equação 5.4. Essa mesma equação desenvolvida consoante as condições deste regime e, usando a mesma nomenclatura anterior, fica desenvolvida da seguinte maneira:

$$q_{perdas} = h_{lat} \cdot A_{lat} \cdot (T_p - T_{\infty}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{lat} \cdot (T_p - T_{\infty})^4$$

✓ Cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção vai-se seguir o mesmo método utilizado no regime descontínuo, sendo que as condições da temperatura média do filme também são as mesmas.

Como se trata de um reator horizontal, o coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície curva do reator (h_{lat}) é calculado pela equação 5.17.

$$h_{lat} = 1,32 (\Delta T / L)^{1/4} \quad (5.17)$$

Para se usar a respetiva correlação, tem-se que verificar se o produto do número de Grashof (Gr) pelo número de Prandtl (Pr) se situa entre 10^3 e 10^9 . O número de Grashof é calculado pela equação 5.6, em que L representa o diâmetro do reator.

Na Tabela 5.8 estão os resultados necessários para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície lateral do reator.

Tabela 5.8: Cálculo do h_{lat}

Gr	$8,6 \times 10^9$
Gr . Pr	$6,3 \times 10^9$
h_{lat} (W/m ² K)	2,88

Voltando ao balanço de energia representado na equação 5.15, os valores necessários para o cálculo do mesmo estão representados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Balanço de energia ao reator

H_s (kW)	118,33
q_{perdas} (kW)	2,87
q (kW)	121,20

Com a potência térmica total necessária para que se dê a reação, é possível calcular o caudal de vapor necessário (\dot{m}_v) para o sistema através da equação 5.8.

Sendo assim, o caudal de vapor necessário para aquecer a raspa no reator, no regime contínuo será de 0,056 kg/s.

Para o cálculo da espessura do isolamento térmico é usado, uma vez mais, o mesmo modelo utilizado pelo regime descontínuo. Para isso é necessário ter em conta que a transmissão de calor ocorre através do vapor, a 130 °C, que transmite calor por convecção à superfície interna da camisa de aquecimento. O calor é daí propagado por condução ao longo do isolamento até à superfície externa do isolamento e, novamente, por convecção e radiação, transmitido ao ar atmosférico. É necessário então, fazer um balanço de energia entre a superfície interna da camisa de aquecimento e a superfície externa do isolamento. De lembrar que o isolamento é de lã rocha e está revestido por uma folha de alumínio. Com as mesmas condições ao regime anterior, mudando apenas as dimensões do reator, e através da equação 5.9 chega-se à conclusão que o revestimento de lã de rocha tem de ter uma espessura de 3 cm. Sendo que o diâmetro externo do reator com isolamento (D_e) fica 1,55 m.

5.2.4 Sistema de Transporte e Agitação

Para o reator horizontal o sistema de agitação escolhido foi o transportador em parafuso representado na Figura 5.6. (López, Boada, & Boada, 2008)

5. PROPOSTA DE INSTALAÇÃO

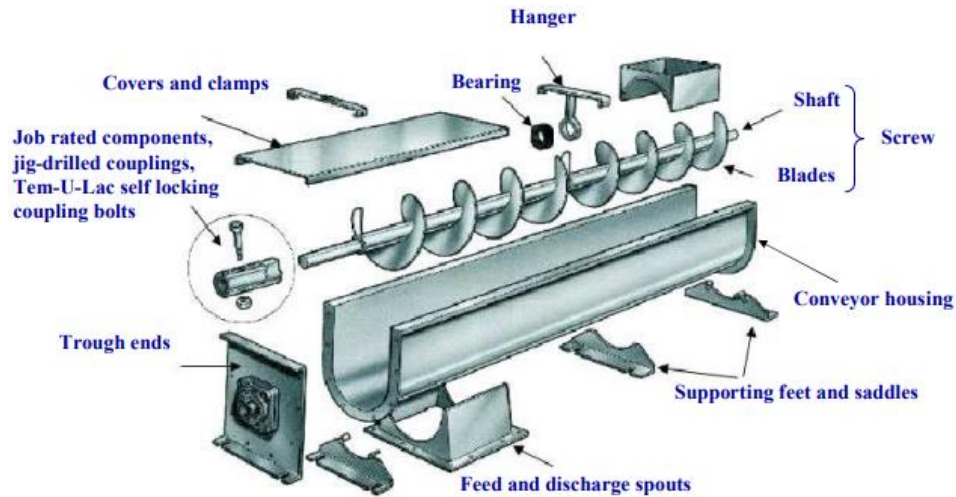


Figura 5.6: Sistema de um transportador em parafuso

Para o cálculo da potência elétrica, em kW, deste sistema de transporte é necessário ter em conta a equação 5.18. (López et al., 2008)

$$P = \frac{Q_a(c_0 L_a + D_a)}{367} + \frac{D_a L_a}{20} \quad (5.18)$$

em que:

Q_a	Caudal do material transportado (ton/h)
D_a	Diâmetro do agitador (m)
L_a	Comprimento do agitador (m)
c_0	Coefficiente empírico da resistência do material

De acordo com a bibliografia o valor de c_0 para este tipo de matéria a tratar, a raspa, é 4. O caudal do material transportado é calculado através da equação 5.19. (López et al., 2008)

$$Q_a = 3600 \cdot \lambda \cdot \frac{\pi D_a^2}{4} \cdot \frac{N t}{60} \cdot \rho \cdot k \quad (5.19)$$

em que:

λ	Tipo de carga a transportar ao longo do sistema
t	Passo do parafuso (m)
N	Velocidade rotacional do parafuso (rpm)
k	Coefficiente de decréscimo do caudal do material

Segundo (López et al., 2008), para uma inclinação do transportador de 0°, o valor de k é igual a 1 e, como o material a transportar ao longo do parafuso é pesado e pouco abrasivo, o valor de λ é de 0,25.

Na Tabela 5.10 encontram-se as características do agitador em parafuso necessário para o regime contínuo.

Tabela 5.10: Características do agitador em parafuso

D_a (m)	1,25
L_a (m)	6,50
t (m)	0,60
N (rpm)	0,40
P (kW)	0,70

5.3 Considerações sobre o tratamento e as instalações

Depois do dimensionamento das instalações é necessário encontrar formas para minimizar ou controlar algumas variáveis do processo.

Deste modo, é necessário reduzir o pH e o teor de enxofre da raspa tripa. Uma possível solução para ultrapassar este inconveniente pode passar por uma lavagem e neutralização da raspa.

Quanto ao controlo de odores, no sistema descontínuo uma solução pode passar por uma ligação desde a tampa do reator até ao sistema de exaustão. Já no sistema contínuo, na zona de saída do reator, estaria uma câmara instalada com ligação a um sistema de exaustão. Para os dois regimes, o sistema de exaustão faria com que os gases expelidos passassem por uma coluna de carvão ativado, retendo os contaminantes.

5. PROPOSTA DE INSTALAÇÃO

Em ambas as gorduras, tanto na proveniente da raspa tripa, bem como da raspa verde, o teor de humidade ultrapassava o valor máximo legislado. Deste modo, seria necessário providenciar um sistema de secagem da gordura.

6. Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

Esta dissertação teve como principal objetivo a proposta de um processo de extração de gordura da raspa. A proposta foi fundamentada com trabalho laboratorial de suporte, nomeadamente a caracterização das raspas e avaliação do potencial de obtenção da gordura.

Com este trabalho concluiu-se que as raspas, verde e tripa de bovino, são possíveis de ser valorizadas para a produção de gordura. Sendo assim, é possível reciclar estes resíduos que normalmente são depositados em aterro, e transformá-los em algo útil.

Na avaliação do processo foi necessário fazer, primeiramente, uma caracterização às raspas. Os valores obtidos encontraram-se dentro do expectável, excetuando o teor de humidade da raspa verde que mostrou-se ser muito baixo. O que era previsto era que os dois tipos de raspas apresentassem características diferentes, tendo em conta a origem das duas.

A raspa verde foi tratada por hidrólise enzimática com o objetivo de tirar o maior rendimento de extração variando a quantidade de enzima e o tempo de reação. Os resultados variaram entre 32% e 38%. O melhor rendimento obtido foi de 38,64% para uma hora de tratamento e 5% de enzima. Verificou-se, deste modo, que para a mesma quantidade de enzima os rendimentos de extração são semelhantes independentemente do tempo e, que com o aumento de percentagem de enzima, o rendimento da hidrólise da enzima diminui.

A hidrólise térmica foi outro método utilizado para a obtenção de gordura a partir da raspa verde e da raspa tripa. Obteve-se um rendimento de extração de 43,70% para a hidrólise da raspa verde e de 47,77% para o tratamento da raspa tripa.

Ao longo do trabalho experimental a heterogeneidade das amostras foi uma constante, não impedindo de se concluir que os processos utilizados para a obtenção de gordura são válidos.

Foi ainda necessário caracterizar a gordura obtida, a fim de se concluir se as suas propriedades estavam dentro dos limites das especificações da gordura animal. A

gordura proveniente da raspa verde tinha os seus parâmetros dentro dos limites das especificações, com exceção do teor de humidade. Já a gordura proveniente da raspa tripa apresentava um teor de enxofre de 665 ppm, ultrapassando o recomendado que especifica um máximo de 100 ppm. O valor do teor de humidade também ultrapassava o valor máximo.

A partir dos resultados experimentais, houve a necessidade de se projetar industrialmente dois sistemas de obtenção de gordura a partir da raspa de bovino. Das 30 toneladas diárias estimadas de raspa, que são depositadas em aterro, é possível obter-se 14 toneladas de gordura, sendo que, cerca de 11 toneladas são provenientes da raspa tripa e, as restantes 3 toneladas provenientes da raspa verde.

Depois de conhecido o poder destes subprodutos para a produção de gordura, estudou-se dois processos, um em regime descontínuo e outro em regime contínuo para aplicação em meio industrial. Ambos os processos têm em comum uma trituração da raspa, seguida de uma digestão e posterior separação de fases por métodos diferentes.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Tratamento prévio às raspas com vista a reduzir, ou até mesmo eliminar, a alcalinidade e teor de enxofre das mesmas, com posterior secagem e trituração.
- Dimensionar um sistema de controlo de odores, sabões e emulsões durante a fase da digestão nos sistemas contínuo e descontínuo.
- Os sistemas propostos devem ser confirmados à escala piloto.

Bibliografia

- Ahmed, M., Idris, A., & Omar, S. R. (2007). Physicochemical Characterization of Compost of the Industrial Tannery Sludge. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 81–94.
- Ananias, E. A., & Pacca, S. A. (2009). Tecnologias Ambientais para Curtumes e sua Adequação como Projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). 2.^a *International Workshop Advances in Cleaner Production*, 1–10.
- AUSTRALIA. (2017). AUSTRALIA - Associação de Utilizadores do Sistema de Tratamento de Águas Residuais de Alcanena. Retrieved October 3, 2017, from www.austra.pt
- Black, M., Canova, M., Stefan, R., Scalet, B. M., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2013). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Tanning of Hides and Skins*. European Commission. <https://doi.org/10.2788/13548>
- Bragança, I., Crispim, A., Sampaio, A., Ramalho, E., Crispim, F., Caetano, N. S., & Silva, P. C. (2013). Adding Value to Tannery Fleshings: Part I – Oils and Protein Hydrolysates – Production and Application. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 97, 62–67.
- Cantera, C., Goya, L., & Mingo, R. (1999). Collagen hydrolysate: “soluble skin” applied in post-tanning processes. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 81, 183–191.
- Cengel, Y. (2014). *Property Tables Booklet for Thermodynamics* (8th Editio).
- Contreras-Ramos, S. M., Alvarez-Bernal, D., Trujillo-Tapia, N., & Dendooven, L. (2004). Composting of Tannery Effluent with Cow Manure and Wheat Straw. *Bioresource Technology*, 94, 223–228.
- Crispim, A., Sampaio, A., Ramalho, E., Ramos, L., Caetano, N. S., Silva, P. C., & Fernandes, R. (2010). Biodiesel from Fleshings. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*.
- Crispim, F., Gaião, J., & Silva, N. (2015). Boas práticas para o setor de curtumes.
- Firestone, D. (1999). *Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes*.
- Geankoplis, C. J. (1993). *Transport Processes and Unit Operations* (3rd Editio). Prentice-Hall International, Inc.
- Getahun, E., & Gabiyye, N. (2013). Experimental investigation and characterization of biodiesel production from leather industry fleshing wastes. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2, 120–129. <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20130203.17>
- Hanna, A. (1996). High exhaust liquid chrome system using wayne CFX. In *The Leather Manufacturer* (pp. 12–16).
- Kanagy, J. R. (1955). Specific Heats of Collagen and Leather. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 55(4), 191–195.
- Kolomaznik, K., Pecha, J., Barinova, M., Sanek, L., Furst, T., & Janacova, D. (2012). Potencial of Tannery Fleshings in Biodiesel Production and Mathematical Modeling of the Fleshing Pre-Treatment. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 3, 44–47.

- López, V. D., Boada, B. L., & Boada, M. J. L. (2008). *Transport Engineering - Screw conveyors*.
- Luís Leal & Filhos S.A. (2015). Luís Leal & Filhos S.A. Retrieved October 14, 2017, from <http://luislealefilhos.webnode.pt/>
- Martignone, G. (1997). Progress for leather makers. In *Leather* (pp. 35–40).
- Math, M. C., Kumar, S. P., & Chetty, S. V. (2010). Optimization of biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Indian Journal of Science and Technology*, 3, 318–321.
- Mirante, F. (2007). *Caracterização por cromatografia gasosa de óleos Mirante vegetais e ceras parafínicas*. Universidade de Aveiro.
- Morais, L. C. de P. (2005). Avaliação da tratabilidade de efluentes da indústria de curtumes por oxidação química.
- Pauckner, W. (1992). *The 1992 Arthur Wilson memorial lecture leather tanning in the year 2000*. (Jalca, Ed.).
- Sekaran, G., Swarnalatha, S., & Srinivasulu, T. (2007). No Title. *Journal on Design and Manufacturing Technologies*, 1, 47–52.
- Sinnott, R. K. (2005). *Coulson & Richardson's Chemical Engineering Design* (4th Editio, Vol. 6). Elsevier.
- Tamilchelvan, P., & Dhinakaran, M. (2012). Anaerobic Digestion Treatment Of Tannery Waste Water. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 932–936.

Anexos

A.1: Humidade e Teor de Sólidos Totais

A humidade é a percentagem de água existente numa dada amostra e que é perdida por secagem até massa constante.

Procedimento:

Pesa-se para um cadinho de porcelana seco, previamente pesado, cerca de 5 g de amostra. Coloca-se a amostra na estufa a 103-105 °C durante 2 horas. Deixa-se arrefecer em exsiccador. Repetem-se as duas últimas operações até que o peso seja constante.

$$\text{Teor de Sólidos Totais (\%)} = \frac{(A - B) \times 100}{C - B}$$

$$\text{Humidade (\%)} = 100 - \text{Teor de Sólidos Totais}$$

Legenda:

A: massa da amostra seca e do cadinho de porcelana, em g

B: massa do cadinho de porcelana, em g

C: massa da amostra húmida mais o cadinho, em g

Referência: D. Eaton et al, 1998. *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington, DC, 20th ed. Capítulo 2540

A.2: Matéria Mineral e Matéria Orgânica

A matéria mineral (cinzas) é o resíduo mineral obtido por incineração.

Procedimento:

Pesa-se para um cadinho de porcelana seco, previamente pesado, uma quantidade de amostra seca. Coloca-se a amostra na mufla a 550 °C durante três horas. Deixa-se arrefecer no exsiccador. Repetem-se as duas últimas operações até que o peso seja constante.

$$\text{Matéria Mineral (\%)} = \frac{(C - B) \times 100}{A - B}$$

$$\text{Matéria Orgânica (\%)} = 100 - \text{Matéria Mineral}$$

Legenda:

A: massa da amostra seca e do cadinho de porcelana, em g

B: massa do cadinho de porcelana, em g

C: massa das cinzas resultantes da ignição da amostra e do cadinho, em g

Referência: D. Eaton et al, 1998. *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington, DC, 20th ed. Capítulo 2540

A.3: Teor de Gordura

O teor de gordura de um sólido é determinado através de uma extração sólido-líquido, na qual um sólido heterogéneo que contém certos componentes solúveis é posto em contacto com um solvente líquido. Deste contacto resulta a transferência dos componentes solúveis para o líquido.

Procedimento:

Coloca-se uma determinada quantidade de amostra seca no interior de um cartucho previamente pesado e coloca-se um pouco de algodão para impedir o arraste da amostra. Coloca-se o volume de solvente, hexano comercial, num balão, previamente pesado. No Soxhlet realiza-se a extração durante quatro horas. Recupera-se o solvente com uma destilação da solução hexano-gordura. Depois da secagem e arrefecimento do balão, pesa-se o conjunto balão mais gordura até peso constante.

$$\text{Teor de Gordura (base seca) (\%)} = \frac{(C - B) \times 100}{A}$$

Legenda:

A: massa do sólido seco inicial, em g

B: massa do balão vazio, em g

C: massa do conjunto balão e gordura, em g

Referência: D. Eaton et al, 1998. *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington, DC, 20th ed. Capítulo 5520

A.4: Índice de Acidez

O índice de acidez é a massa de hidróxido de sódio necessária para neutralizar os ácidos gordos livres contidos num grama de gordura, expresso em percentagem de ácido oleico.

Procedimento:

Pesa-se, aproximadamente, 2,5 g de gordura homogeneizada. Dissolve-se a gordura em 150 mL de mistura dissolvente (volumes iguais de éter etílico e álcool etílico a 95%). Agita-se, adicionando algumas gotas de solução de fenolftaleína, e titula-se até o aparecimento de cor rosada com solução padrão de hidróxido de sódio 0,1N.

$$\text{Índice de Acidez (\%)} = \frac{282 \times C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times 100}{m \times 1000}$$

Legenda:

C_{NaOH} : concentração de solução padrão de hidróxido de sódio, expresso em mol/L

V_{NaOH} : volume de solução padrão de hidróxido de sódio gasto na titulação, expresso em mL

m : massa de amostra da gordura a testar, expressa em g

Referência: Norma ISO 660:2009

A.5: Número de Iodo

O número de iodo é determinado pelo grau de insaturação da gordura, expresso em massa de iodo absorvido por 100 g de amostra.

Procedimento:

Dissolve-se, aproximadamente, 0,20 g de amostra de gordura em 20 mL de solvente (volumes iguais de ciclohexano e ácido acético glacial). Adiciona-se 25,00 mL de reagente de Wijs. Agita-se suavemente e tapa-se o matraz. Prepara-se um branco, com o solvente e o reagente de Wijs, omitindo a amostra. Coloca-se os matrizes, durante 1 hora, na escuridão. No fim do tempo de reação, adiciona-se 20 mL de iodeto de potássio e 150 mL de água desmineralizada. Titula-se com solução padrão de tiosulfato de sódio até a cor castanho/amarelo (devido à presença de iodo) fique amarelo palha. Adiciona-se algumas gotas de solução de amido, sendo que a solução adquire cor azul. Continua-se a titulação até que a cor desapareça. Realiza-se o mesmo procedimento para o ensaio branco.

$$\text{Número de Iodo (g iodo/100 g amostra)} = \frac{12,69 \times C_{Tio} \times (V_1 - V_2)}{m}$$

Legenda:

C_{Tio} : concentração de solução padrão de tiosulfato de sódio, expresso em mol/L

V_1 : volume de solução padrão de tiosulfato de sódio gasto na titulação do ensaio branco, expresso em mL

V_2 : volume de solução padrão de tiosulfato de sódio gasto na titulação da amostra, expresso em mL

m : massa de amostra da gordura a testar, expressa em g.

Referência: Norma ISO 3961:1996

A.6: Índice de Insaponificação

O índice de insaponificação é toda a matéria presente na amostra a qual, após saponificação da mesma com hidróxido de potássio e extração por solvente específico, não é volátil nas condições operatórias especificadas.

Procedimento:

Num balão de vidro de 250 mL pesa-se cerca de 5,00 g de amostra de gordura. Adiciona-se 50 mL de solução alcoólica 1 mol/L de hidróxido de potássio e algumas esferas de vidro. Deixa-se ferver durante uma hora. No fim do tempo de reação, junta-se 50 mL de água e deixa-se arrefecer. Transfere-se a solução para uma ampola de decantação de 250 mL. Utilizando um total de 50 mL, lava-se várias vezes o balão e as esferas de vidro e junta-se à ampola. Agita-se a ampola e deixa-se repousar até que ocorra a separação completa das duas fases. Para uma segunda ampola, deixa-se escorrer a fase inferior. Extrai-se mais duas vezes a solução aquosa de sabões com 100 mL de éter etílico de cada vez. Junta-se os três extratos etéreos numa ampola de decantação. Lava-se três vezes os extratos com porções de 25 mL de solução etanólica a 10%, eliminando-se esta após cada lavagem. Continua-se a lavagem com a mesma solução até que, após adição de uma gota de solução de fenolftaleína, as lavagens não apresentem coloração rosa. Transfere-se a solução de hexano para um balão de 250 mL, previamente seco em estufa e pesado. Seca-se, por períodos de 15 minutos, com arrefecimento em exsiccador e pesagem, até que a perda de massa entre duas pesagens consecutivas seja inferior a 1,5 mg. Dissolve-se o resíduo em 4 mL de hexano e 20 mL de etanol previamente neutralizado. Titula-se com solução etanólica padrão de hidróxido de potássio 0,1 mol/L. Prepara-se um ensaio em branco de igual forma, mas omitindo a amostra.

$$\text{Índice de Insaponificação (\%)} = \frac{100 (m_1 - m_2 - m_3)}{m_0}$$

Legenda:

m_0 : massa da mostra, em g

m_1 : massa do resíduo seco, em g

m_2 : massa do resíduo seco obtido com o ensaio em branco, em g

m_3 : massa dos ácidos gordos livres, e se presentes, que igualem $0,28 \times V \times C$, em g

V: volume da solução de hidróxido de potássio usada na titulação do resíduo, em mL

C: concentração de solução padrão de hidróxido de potássio usada na titulação, em mol/L

Referência: Norma ISO 18609:2004

A.7: Teor de Enxofre

Procedeu-se à realização de fluorescência por Raio-X (XRF) para determinar o teor de enxofre, em ppm, presente nas amostras. Este ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos do aparelho *X-Supreme 8000* da marca *Oxford Instruments*, tendo sempre em atenção à homogeneização das amostras para serem equiparáveis entre si.

B.1: Caracterização das Raspas

As raspas de bovino, raspa verde e raspa tripa, foram caracterizadas segundo o *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater*. Os parâmetros avaliados foram a humidade e os sólidos totais, a matéria mineral e orgânica e o teor de gordura. Na Tabela B.1 encontram-se os resultados obtidos na caracterização da raspa verde de bovino. Abaixo da tabela seguem-se os exemplos de cálculo para os diferentes parâmetros, de referir que os referidos exemplos dizem respeito ao ensaio 1.

Tabela B.1: Resultados obtidos na caracterização da raspa verde

Ensaio	m _{cadinho} (g)	m _{amostra} (g)	m _{amostra seca + cadinho} (g)	m _{cinzas + cadinho} (g)	Hum (%)	MM (%)
1	41,4199	5,4696	45,2458	41,4323	30,05	0,03
2	39,8175	5,2250	43,9504	39,8259	20,90	0,02
3	37,6667	5,5369	42,0184	37,6758	21,41	0,02
4	44,2292	5,2354	48,3786	44,2387	20,74	0,02
5	36,8911	5,3962	40,7302	36,9041	28,86	0,03
Teor de humidade médio (%)						24,39
Teor de sólidos totais médio (%)						75,61
Teor de matéria mineral médio (% base seca)						0,02
Teor de matéria orgânica médio (% base seca)						99,98

Exemplos de cálculo:

$$ST (\%) = \frac{45,2458 - 41,4199}{5,4696} \times 100 = 69,95\%$$

$$Hum (\%) = 100 - 69,95 = 30,05\%$$

$$MM (\%) = \frac{41,4323 - 41,4199}{45,2458} \times 100 = 0,03\%$$

$$MO (\%) = 100 - 0,03 = 99,97\%$$

Na Tabela B.2 encontram-se os resultados obtidos para o teor de gordura da raspa verde de bovino. Abaixo da tabela segue-se o exemplo de cálculo para o ensaio 1.

Tabela B.2: Resultados obtidos para o teor de gordura da raspa verde

Ensaio	m _{balão} (g)	m _{amostra} (g)	m _{balão+gordura} (g)	TG (%)
1	106,5093	10,6516	110,6712	51,68
2	125,0954	10,6651	129,1201	49,89
3	109,9041	10,4043	112,5922	34,00
Teor de gordura médio (% base seca)				45,19

Exemplo de cálculo:

$$TG (\% \text{ base seca}) = \frac{110,6712 - 106,5093}{10,6516 \times 0,7561} \times 100 = 51,68\%$$

A Tabela B.3 e a Tabela B.4 dizem respeito aos resultados obtidos dos parâmetros avaliados para a raspa tripa de bovino. Os exemplos de cálculo acima descritos servem como modelo para os seguintes resultados.

Tabela B.3: Resultados obtidos na caracterização da raspa tripa

Ensaio	m _{cadinho} (g)	m _{amostra} (g)	m _{amostra seca + cadinho} (g)	m _{cinzas + cadinho} (g)	Hum (%)	MM (%)
1	41,5947	7,8005	42,7979	41,8905	84,58	0,69
2	44,2314	6,1346	45,6832	44,6366	76,33	0,89
3	40,1734	7,6012	41,6469	40,3608	80,61	0,45
4	37,2151	6,3598	38,6646	37,4607	77,21	0,64
5	38,5160	7,7871	40,2012	38,7237	78,36	0,52
Teor de humidade médio (%)						79,42
Teor de sólidos totais médio (%)						20,58
Teor de matéria mineral médio (% base seca)						0,64
Teor de matéria orgânica médio (% base seca)						99,36

Tabela B.4: Resultados obtidos para o teor de gordura da raspa tripa

Ensaio	m _{balão} (g)	m _{amostra} (g)	m _{balão+gordura} (g)	TG (%)
1	125,0909	14,2643	125,8157	24,69
2	109,9077	14,7414	110,8318	30,13
3	120,7003	12,3302	121,7064	39,65
Teor de gordura médio (% base seca)				31,60

B.2: Caracterização da Gordura

Na Tabela B.5 encontram-se os resultados obtidos para o teor de humidade da gordura proveniente da raspa verde. Abaixo da tabela segue o exemplo de cálculo do ensaio 1.

Tabela B.5: Resultados obtidos para o teor de humidade da gordura proveniente da raspa verde

Ensaio	m_{cadinho} (g)	m_{amostra} (g)	$m_{\text{amostra seca}} + \text{cadinho}$ (g)	Hum (%)
1	40,1704	5,1979	45,3351	0,64
2	38,2440	5,3591	43,5762	0,50
3	44,2302	5,5085	49,6999	0,70
Teor de humidade médio (%)				0,61

Exemplo de cálculo:

$$ST (\%) = \frac{45,3351 - 40,1704}{5,1979} \times 100 = 99,36\%$$

$$Hum (\%) = 100 - 99,36 = 0,64\%$$

Na Tabela B.6 encontram-se os resultados obtidos para o índice de acidez da gordura proveniente da raspa verde. Abaixo da tabela segue o exemplo de cálculo do ensaio 1.

Tabela B.6: Resultados obtidos para o índice de acidez da gordura proveniente da raspa verde

Ensaio	m_{amostra} (g)	$V_{\text{NaOH gasto}}$ (mL)	C_{NaOH} (mol/L)	IA (%)
1	2,5750	4,8	0,1011	5,31
2	2,5970	4,9		5,38
3	2,5781	4,8		5,31
Índice de Acidez médio (%)				5,34

Exemplo de cálculo:

$$\text{Índice de Acidez (\%)} = \frac{282 \times 0,1011 \times 4,8 \times 100}{m \times 1000} = 5,31\%$$

Na Tabela B.7 encontram-se os resultados obtidos para o número de iodo da gordura proveniente da raspa verde. Abaixo da tabela segue o exemplo de cálculo do ensaio 1.

Tabela B.7: Resultados obtidos para o número de iodo da gordura proveniente da raspa verde

Ensaio	m_{amostra} (g)	V_1 (mL)	V_2 (mL)	C_{Tio} (mol/L)	NI (g iodo/100 g amostra)
1	0,2313	43,4	34,0	0,1179	60,80
2	0,2473		33,8		58,08
Número de iodo médio (g iodo/100 g amostra)					59,44

Exemplo de cálculo:

$$\begin{aligned} \text{Número de Iodo (g iodo/100 g amostra)} &= \frac{12,69 \times 0,1179 \times (43,3 - 34,0)}{0,2313} \\ &= 60,80 \text{ g iodo/100 g amostra} \end{aligned}$$

Na Tabela B.8 encontram-se os resultados obtidos para o teor de humidade da gordura proveniente da raspa tripa.

Tabela B.8: Resultados obtidos para o teor de humidade da gordura proveniente da raspa tripa

Ensaio	m_{cadinho} (g)	m_{amostra} (g)	$m_{\text{amostra seca}} + \text{cadinho}$ (g)	Hum (%)
1	62,7222	5,1920	67,8563	1,12
Teor de humidade (%)				1,12

Na

Tabela B.9 encontram-se os resultados obtidos para o índice de acidez da gordura proveniente da raspa tripa.

Tabela B.9: Resultados obtidos para o índice de acidez da gordura proveniente da raspa tripa

Ensaio	m_{amostra} (g)	$V_{\text{NaOH gasto}}$ (mL)	C_{NaOH} (mol/L)	IA (%)
1	2,7287	0,5	0,1011	0,52
2	2,6008	0,4		0,44
Índice de Acidez médio (%)				0,48

Na Tabela B.10 encontram-se os resultados obtidos para o número de iodo da gordura proveniente da raspa tripa.

Tabela B.10: Resultados obtidos para o número de iodo da gordura proveniente da raspa tripa

Ensaio	m_{amostra} (g)	V_1 (mL)	V_2 (mL)	C_{Tio} (mol/L)	NI (g iodo/100 g amostra)
1	1,9876	43,2	5,3	0,09922	24,01
2	2,7854		4,4		17,54
Número de Iodo médio (g iodo/100 g amostra)					20,78

B.3: Exemplos de Cálculo do Capítulo 5

- Cálculo da determinação das dimensões do reator do sistema descontínuo

$$V_{reator} = \pi \frac{d_i^2}{4} h = 9$$

Em que:

$$\frac{h}{d_i} = 3 \Leftrightarrow h = 3d_i$$

Sendo assim:

$$V_{reator} = \pi \frac{d_i^2}{4} 3d_i = 9$$

$$\Leftrightarrow d_i = 1,56 \text{ m}$$

- Cálculo da espessura do isolamento do reator do sistema descontínuo (Equação 5.9)

$$\frac{T_v - T_s}{\frac{\Delta r}{kA_{ml}}} = h_{lat} \pi D_e L (T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma \pi D_e L (T_s - T_\infty)^4$$

Em que:

$$\frac{\Delta r}{kA_{ml}} = \frac{\Delta r}{k \frac{2\pi \Delta r L}{\ln(r_e/r_i)}} = \frac{\ln(D_e/D_i)}{k 2\pi L}$$

$$D_e = 1,56 + 2 \times 0,01 + 2 \times 0,075 + 2x = 1,73 + 2x$$

$$D_i = 1,56 + 2 \times 0,01 + 2 \times 0,075 = 1,73$$

Sendo assim:

$$\frac{T_v - T_s}{\frac{\ln(D_e/D_i)}{k 2\pi L}} = h_{lat} \pi D_e L (T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma \pi D_e L (T_s - T_\infty)^4$$

$$\Leftrightarrow \frac{130 - 45}{\frac{\ln((1,73 + 2x)/1,73)}{0,029 \times 2}} = 3,86 (1,73 + 2x)(45 - 15) + 0,05 \times 5,67 \times 10^{-8} (1,73 + 2x)((45 + 273) - (15 + 273))^4$$

$$x = 0,02$$