



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de São José do Rio Preto

Halissom Clever Sanches

**Caracterização de propriedades físicas do leite de diferentes
espécies: ferramenta para aplicação de ultrassom**

São José do Rio Preto
2022

Halissom Clever Sanches

**Caracterização de propriedades físicas do leite de diferentes
espécies: ferramenta para aplicação de ultrassom**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Barretto Penna

Coorientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

São José do Rio Preto
2022

S211c

Sanches, Halissom Clever

Caracterização de propriedades físicas do leite de diferentes espécies: ferramenta para aplicação de ultrassom / Halissom Clever Sanches. -- São José do Rio Preto, 2022

77 p. : tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Ana Lúcia Barretto Penna

Coorientador: Javier Telis Romero

1. Leite. 2. Modelagem matemática. 3. Processos térmicos. 4. Viscosidade. 5. Calor específico. 6. Campo acústico. 7. Acidez. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. II. Penna, Ana Lúcia Barretto. III. Romero, Javier Telis. IV. Título.

CDU –

Halissom Clever Sanches

**Caracterização de propriedades físicas do leite de diferentes
espécies: ferramenta para aplicação de ultrassom**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Comissão Examinadora

Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Barretto Penna

Universidade Estadual Paulista (UNESP) - São José do Rio Preto/SP
Orientador

Prof.^a Dr.^a Raquel Guttierres Gomes

Universidade Estadual de Maringá (UEM) – Maringá/PR

Prof. Dr. Marcos Alexandre Polizelli

Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (UNIFEB) – Barretos/SP

São José do Rio Preto
05 de outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço pelas diversas formas de contribuição neste trabalho e na minha formação, as seguintes pessoas: à minha mãe Vanderli Bartolomei Sanches, ao meu pai Ademir Sanches, à minha orientadora Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Barretto Penna, ao meu coorientador Prof. Dr. Javier Telis Romero, a todos professores do programa de pós-graduação da Engenharia e Ciência de Alimentos que tive a oportunidade de participar das aulas, a todos alunos e amigos do curso que tive a oportunidade da troca de ideias que contribuíram com este trabalho, à administração da Unesp que suporta o programa de pós graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos e, por fim, aos amigos externos à Unesp que contribuíram com grande incentivo.

RESUMO

O leite é um produto importante na alimentação humana devido a seu elevado valor nutricional, e utilizado como ingrediente em diversos tipos de alimentos. Diferentes processos industriais são aplicados ao leite para consumo como leite fluido, assim como para a fabricação de diversos derivados, tais como queijos, leites fermentados, manteiga, leites concentrados e desidratados, entre outros. Esses processos são essenciais para garantir segurança e qualidade ao produto final. O conhecimento das propriedades termofísicas dos alimentos, tal como o calor específico e viscosidade, são necessários para o dimensionamento de projetos térmicos, bem como a determinação do campo acústico em processos que envolvam o uso do ultrassom (US). Este trabalho objetivou determinar o calor específico e a viscosidade de leite de quatro diferentes espécies (vaca, búfala, cabra e ovelha) em uma ampla faixa de temperatura (1 – 90°C), propor um modelo matemático para descrever os dados experimentais, comparar os modelos obtidos com as equações tradicionais, determinar o campo acústico, assim como testar o efeito da aplicação de US ao leite cru recém ordenhado, para as espécies de vaca e cabra, a fim de analisar a conservação. A composição química do leite foi determinada para verificar sua influência no calor específico e na viscosidade. O calor específico aumentou com a temperatura e é maior para leite com baixos teores de sólidos e de lipídeos. Os modelos polinomiais de primeira e segunda ordem melhor se ajustaram aos dados experimentais do calor específico em função da temperatura. A viscosidade do leite das diferentes espécies foi descrita pela Lei de Newton e a influência da temperatura na viscosidade foi descrita pela equação de Arrhenius. O campo acústico foi determinado para potências nominais de 300, 500 e 700W, com eficiência decrescente à medida que se aumentou a potência nominal, de 18,8 a 12,9%. O leite de cabra apresentou valores mais altos de eficiência comparado ao leite de vaca, provavelmente em função da estrutura dos glóbulos de gordura. Os teores de lipídeos e de proteínas e a acidez titulável foram determinados para verificar a ação do US, imediatamente após tratamento e após 7 dias sob refrigeração. Nas condições estudadas, US alterou as características do leite, evidenciado pelo aumento da acidez, que aumentou em potências mais elevadas. Estudos adicionais, incluindo uma maior diversidade de análises se fazem necessários para melhor entendimento do aumento da acidez com a aplicação de US.

Palavras-chave: Leite. Modelagem matemática. Processos térmicos. Viscosidade. Calor específico. Campo acústico. Acidez.

ABSTRACT

Milk is an important product in human nutrition due to its high nutritional value, and it has been used as an ingredient in several types of food. Different industrial processes are applied to milk for consumption as fluid milk, as well as to the manufacture of various dairy products, such as cheese, fermented milk, butter, concentrated and dehydrated milk, among others. These processes are essential to guarantee the safety and quality of the final product. The knowledge of thermophysical properties of foods, such as specific heat and viscosity, are necessary for the design of thermal projects, as well as the determination of the acoustic field in processes involving the use of ultrasound (US). This study aimed to determine the specific heat and viscosity of milk from four different species (cow, buffalo, goat and sheep) over a wide temperature range (1 - 90°C), to propose a mathematical model to describe the experimental data, to compare the obtained models with the traditional equations, as well as determining the acoustic field and testing the effect of US applying to freshly milked raw milk, for cow and goat species, in order to evaluate its preservation. The chemical composition of milk was determined to verify its influence on specific heat and viscosity. The specific heat increased with temperature and it is higher for milk with low solids and lipids. The first and second order polynomial models best fit the experimental data of specific heat as a function of temperature. The milk viscosity from different species was described by Newton model and the influence of the temperature in the viscosity was described by Arrhenius equation. The acoustic field was determined for nominal input power of 300, 500 and 700W, with efficiency from 18.8 to 12.9%, decreasing as the nominal input power increased. The goat milk showed higher values of efficiency than in cow's milk, probably due to its structure of fat globules. Analysis of lipids and protein content, and acidity were determined to verify the action of US, immediately after US treatment and after 7 days under refrigeration. Under the studied conditions, US altered the milk's characteristics, as evidenced by the increase in acidity, which increased in higher power. Further studies, including a greater diversity of analyzes are necessary for a better understanding of the increase in acidity with US.

Keywords: Milk. Mathematical modeling. Thermal processes. Viscosity. Specific heat. Acoustic field. Acidity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de utilização dos diferentes efeitos do ultrassom em produtos lácteos.	21
Figura 2 – Classificação do comportamento reológico de fluidos.	28
Figura 3 – Ekomilk M.	35
Figura 4 - DSC 8000, Perkin Elmer.	36
Figura 5 - Reômetro rotacional modelo ARG2, TA Instruments.....	40
Figura 6 - Processador ultrassônico VCX 1500.....	40
Figura 7 - Esquema do experimento para medidas de campo acústico.....	41
Figura 8 - Temopar modelo Penta III.....	42
Figura 9 – A) Arranjo experimental para tratamento de leite com ultrassom; B) Detalhe lateral dos sensores de temperatura; C) Detalhe frontal dos sensores de temperatura e da Sonda de Ultrassom.....	43
Figura 10 – Calor específico do leite de diferentes espécies, em função da temperatura. Os pontos representam o valor médio dos dados obtidos experimentalmente, enquanto as linhas contínuas representam o melhor modelo matemático.	48
Figura 11 – Viscosidade do leite de vaca em função da temperatura, sendo os quadrados vazios os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.....	55
Figura 12 – Viscosidade do leite de búfala em função da temperatura, sendo círculos sólidos os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.....	55
Figura 13 – Viscosidade do leite de cabra em função da temperatura, sendo quadrados sólidos os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.....	56
Figura 14 – Viscosidade do leite de ovelha em função da temperatura, sendo os círculos vazios os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.....	56

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Maiores produtores de leite no Mundo, em 2020 (FAO, 2020).	16
Quadro 2 - Os dez maiores produtores de leite de vaca, em 2020 (FAO, 2020).	16
Quadro 3 - Os dez maiores produtores de leite de búfala, em 2020 (FAO, 2020).	16
Quadro 4 - Os dez maiores produtores de leite de cabra, em 2020 (FAO, 2020).	16
Quadro 5 - Os dez maiores produtores de leite de ovelha, em 2020 (FAO, 2020).	16
Quadro 6 – Equações preditivas para calor específico dos principais componentes dos alimentos ($0 \leq T \leq 150^\circ$).	26
Tabela 1 - Variáveis e níveis de variação.	43
Tabela 2 – Composição química do leite de diferentes espécies (g/100 g de amostra).	44
Tabela 3 – Calor específico (C_p , J.kg-1.°C-1) de leite de diferentes espécies, em diferentes temperaturas.	46
Tabela 4 – Modelos polinomiais empíricos para calor específico de leite de diferentes espécies, em função da temperatura.	47
Tabela 5 – Comparação entre o modelo matemático e equações de Choi e Okos (1986) para o calor específico em leite de vaca e búfala. EMR: erro médio relativo.	49
Tabela 6 – Comparação entre o modelo matemático e equações de Choi e Okos (1986) para o calor específico em leite de cabra e ovelha. EMR: erro médio relativo.	49
Tabela 7 – Viscosidade média (μ , mPa.s) de leite de diferentes espécies, em diferentes temperaturas (°C).	50
Tabela 8 – Comparação dos modelos reológicos para leite de vaca.	51
Tabela 9 – Comparação dos modelos reológicos para leite de búfala.	51
Tabela 10 – Comparação dos modelos reológicos para leite de cabra.	52
Tabela 11 – Comparação dos modelos reológicos para leite de ovelha.	52
Tabela 12 – Parâmetros estatísticos da Lei de Newton.	53
Tabela 13 – Parâmetros estatísticos das equações que relacionam a Viscosidade e a Temperatura, com os dados obtidos pela Lei de Newton.	54
Tabela 14 – Leite de Vaca, derivada da temperatura em função do tempo (dT/dt) para cada potência de ultrassom aplicada.	57
Tabela 15 – Leite de Cabra, derivada da temperatura em função do tempo (dT/dt) para cada potência de ultrassom aplicada.	57
Tabela 16 – Potência acústica e eficiência em função da potência nominal aplicada pela sonda, para cada espécie de leite.	58
Tabela 17 – Teor de lipídeos (%) do leite no dia dos tratamentos (D+0) e sete dias após os tratamentos (D+7).	59
Tabela 18 – Teor de proteínas (%) do leite no dia dos tratamentos (D+0) e sete dias após os tratamentos (D+7).	60

Tabela 19 – Acidez titulável (°D) do leite no dia dos tratamentos (D+0) e sete dias após os tratamentos (D+7). 62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemistry</i>
CCS	contagem de células somáticas
C_p	calor específico
DCC	delineamento central composto
DE	densidade energética
DIC	delineamento inteiramente casualizado
D_s	potência térmica
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> ou Calorimetria Diferencial de Varredura
dT/dt	taxa de aquecimento
E_a	energia de ativação
EMR	erro médio relativo
EUA	Estados Unidos da América
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
IAL	Instituto Adolfo Lutz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
m	massa de líquido
P	erro médio relativo
P_{acústica}	potência acústica
R	constante universal dos gases (8,3145 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
R²	coeficiente de determinação
R_{Adj}²	coeficiente de determinação ajustado
RQME	raiz do erro quadrático médio
T	temperatura
UHT	<i>Ultra High Temperature</i> ou Ultra Alta Temperatura
US	Ultrassom
W_s	massa da amostra
X_i	fração mássica do componente <i>i</i>
χ²	coeficiente de determinação reduzido

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
$\Delta H_{\text{fusão}}$	variação de entalpia
°C	grau celsius
μ	viscosidade Newtoniana
μL	microlitro
μ_{pl}	viscosidade plástica
cm	centímetro
CO ₂	dióxido de carbono
Hz	Hertz
J/g	joule por grama
J/mL	joule por mililitro
K	Kelvin
kg/cm ²	quilograma por centímetro quadrado
kHz	quilo-hertz
kJ	quilo-joule
mcal/s	mili-calorias por segundo
mg	miligrama
min	minuto
mL	mililitro
mm	milímetro
mW	mili-watt
n	índice de comportamento
Pa	Pascal
s	segundo
W	Watt
W/cm ²	watt por centímetro quadrado
γ	taxa de deformação
θ	taxa de aquecimento
κ	índice de consistência
σ	tensão de cisalhamento
σ_0	tensão residual
ϕ_i	constante empírica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Leite e processos de conservação	15
2.2. Características de leite de diferentes espécies animais	18
2.3. Uso de ultrassom em produtos lácteos	20
2.4. Propriedades Físicas	24
2.4.1. Calor específico	25
2.4.2. Viscosidade e parâmetros reológicos.....	27
2.4.3. Campo acústico	32
3. OBJETIVOS	33
3.1. Objetivos gerais	33
3.2. Objetivos específicos	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1. Obtenção e caracterização das matérias primas.....	34
4.2. Composição química do leite de diferentes espécies	35
4.3. Determinação do calor específico e modelagem matemática	36
4.4. Determinação dos parâmetros reológicos e modelagem matemática	38
4.5. Determinação do campo acústico e modelagem matemática	40
4.6 Aplicação de ultrassom em leite.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1. Composição química do leite de diferentes espécies	44
5.2. Calor específico e modelagem matemática	45
5.3. Parâmetros reológicos e modelagem matemática	50
5.4. Campo acústico e modelagem matemática	56
5.5. Aplicação de US em leite.....	59
6. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	64
APÊNDICE A.....	77
APÊNDICE B.....	77

1. INTRODUÇÃO

O leite é um dos alimentos mais consumidos no mundo, fazendo parte da base da alimentação dos seres humanos, seja leite puro, através de seus derivados ou como matéria prima para diversos alimentos. Para cada região do globo, leite de diferentes espécies se destacam, sendo leite de vaca o principal; leite de cabra, leite de búfala e leite de ovelha também se destacam, dependendo da região, condições climáticas e hábitos alimentares. Devido à grande importância desse alimento na cadeia alimentar, intensos e constantes estudos são fundamentais, a fim de possibilitar melhores e mais eficientes formas de aproveitamento deste importante alimento.

As características físicas do leite têm grande importância em vários estudos: i) para o dimensionamento de equipamentos industriais no processamento de leite e derivados, desde a ordenha na fazenda até o consumo final pelo ser humano, incluindo as etapas de transporte, conservação, transformação, embalagem, etc., onde pequenas variações de temperatura devem ser levadas em consideração para que não se modifiquem as características finais desejadas; ii) no emprego de novas tecnologias de conservação, tais como processos não-térmicos (ultrassom, alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado, entre outras), iii) assim como para obter alterações da estrutura física (redução dos glóbulos de gordura, emulsificação, alteração da viscosidade, cristalização no caso de sorvetes, etc.), ampliando as possibilidades de uso das tecnologias já tradicionalmente executadas na indústria láctea.

Dentre as novas tecnologias para conservação e processamento de alimentos, o uso do ultrassom (US) de alta potência e baixa frequência, tem se mostrado uma opção interessante na alteração da estrutura física e microbiota do leite, quando usado como matéria prima para produção de diversos derivados, como iogurtes, queijos, leite fermentado, sorvetes, manteigas, leite em pó, leite condensado, entre outros.

Os estudos de aplicação de US em leite são dos mais variados, desde objetivando a conservação das propriedades do leite sem tratamento térmico, até alterações das propriedades físico-químicas e microbiológicas para produção de iogurtes, que resultam na redução do tempo de fermentação e melhora na qualidade do produto final.

Quando o leite ou seus derivados são tratados com US, a determinação do campo acústico também se torna importante para o entendimento de como a energia liberada pela sonda de US se propaga no meio, sendo um parâmetro crucial para o projeto de equipamentos e definição das condições de processo.

Neste contexto, estudos mais detalhados e precisos dos parâmetros físicos de leite de diferentes espécies, tais como vaca, cabra, búfala e ovelha, são necessários

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Leite e processos de conservação

O leite é um dos produtos da agropecuária mais importantes da dieta humana. Está presente na alimentação de cerca de 80% da população, contribuindo com 5% da energia, 10% da proteína e 9% da gordura consumida no planeta. No Brasil, o valor de vendas da fabricação de produtos lácteos é somente menor que o de carnes, açúcar, cerveja e refrigerante, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Portanto, o setor lácteo gera mais riqueza que milho, soja e café, *commodities* de grande relevância do agronegócio do país. Ele é um dos produtos que compõem a cesta básica brasileira, estando presente em 91,6% dos lares. Outros derivados lácteos também possuem elevados índices de consumo, tais como leite condensado (90,1%), creme de leite (89,7%) e requeijão (64,5%), conforme pesquisa realizada para a Associação Brasileira de Supermercados (EMBRAPA, 2020).

O total de leite produzido no Brasil em 2020 chegou a 35,45 bilhões de litros, registrando um aumento de 15,40% desde 2010 e 1,51% maior em relação à 2019 (IBGE, 2020). A produção de leite no Brasil é predominantemente de vaca, com 99,62% da produção total de leite no país, sendo 0,01% leite de ovelha, 0,09% leite de cabra e 0,29% leite de búfala, segundo o Censo Agro 2017 (IBGE, 2017). Contudo, apesar da menor produção, leite de outras espécies produzidas no país tem sua importância na geração de emprego, renda e produtos com características artesanais. Numerosos estudos se concentraram no leite de vaca, embora leite de outras espécies animais, como búfalos, ovelhas, cabras e camelos, seja essencial para a dieta humana em várias partes do mundo (MÉNARD et al., 2010). O preço médio pago por litro de leite no Brasil foi R\$ 1,073 para o leite de vaca, R\$ 2,050 para o leite de búfala, R\$ 2,413 para o leite de cabra e R\$ 3,075 para o leite de ovelha, caracterizando importante geração de valor na produção brasileira para o leite de outras espécies (IBGE, 2020).

No cenário mundial, como maiores produtores de leite (todas espécies), se destacam Índia, União Europeia e EUA, estando o Brasil em uma posição de destaque na sexta colocação com 4,2% da produção Mundial (Quadro 1). Na produção de leite de vaca, União Europeia e EUA são líderes com 256 milhões de toneladas (Quadro 2). Para o leite de búfala, Índia e Paquistão tem a maior representatividade com 127 milhões de toneladas (Quadro 3).

Quadro 1 - Maiores produtores de leite no Mundo, em 2020 (FAO, 2020).

País	Produção (ton)
1 Índia	183.955.490
2 União Europeia	160.145.120
3 EUA	101.276.991
4 Paquistão	60.770.000
5 China	39.219.532
6 Brasil	36.806.788
7 Rússia	32.219.165
8 Nova Zelândia	21.871.305
9 Turquia	21.839.351
10 Reino Unido	15.558.000
Mundo	886.847.157

Quadro 2 - Os dez maiores produtores de leite de vaca, em 2020 (FAO, 2020).

País	Produção (ton)
1 União Europeia	154.399.730
2 EUA	101.251.009
3 Índia	87.822.387
4 Brasil	36.508.411
5 China	34.837.215
6 Rússia	31.959.801
7 Paquistão	22.508.000
8 Nova Zelândia	21.871.305
9 Turquia	20.000.000
10 Reino Unido	15.558.000
Mundo	718.038.443

Quadro 3 - Os dez maiores produtores de leite de búfala, em 2020 (FAO, 2020).

País	Produção (ton)
1 Índia	90.026.273
2 Paquistão	37.256.000
3 China	2.919.966
4 Egito	1.747.641
5 Nepal	1.380.600
6 União Europeia	289.950
7 Myanmar	205.102
8 Irã	128.000
9 Mongólia	104.645
10 Indonésia	89.983
Mundo	134.425.197

O leite de cabra tem destaque para Índia, Bangladesh e União Europeia (Quadro 4). União Europeia e China são os maiores produtores de leite de ovelha (Quadro 5). Tanto leite de ovelha como de cabra tem uma contribuição na produção mundial bem menor que leite de vaca e de búfala.

Quadro 4 - Os dez maiores produtores de leite de cabra, em 2020 (FAO, 2020).

País	Produção (ton)
1 Índia	5.888.077
2 Bangladesh	2.671.911
3 União Europeia	2.490.420
4 Sudão	1.165.043
5 Paquistão	965.000
6 Turquia	554.143
7 Sudão do Sul	467.148
8 Nigéria	407.346
9 Somália	377.742
10 Indonésia	370.708
Mundo	20.617.503

Quadro 5 - Os dez maiores produtores de leite de ovelha, em 2020 (FAO, 2020).

País	Produção (ton)
1 União Europeia	2.965.020
2 China	1.211.831
3 Turquia	1.207.427
4 Síria	705.582
5 Argélia	592.293
6 Sudão	416.002
7 Somália	406.541
8 Irã	376.202
9 Índia	212.113
10 Afeganistão	204.500
Mundo	10.616.017

O leite pode ser contaminado por micro-organismos pela falta de cuidados higiênicos durante a ordenha (utensílios de ordenha não adequadamente higienizados, água contaminada, úberes mal higienizados, fezes e partículas de poeira) e no transporte (veículos mal higienizados). Devido ao seu alto valor nutricional e conteúdo de água, o leite é um meio favorável para o crescimento de micro-organismos patogênicos e, portanto, é rapidamente sujeito à deterioração.

As enzimas do leite também desempenham um papel importante no crescimento microbiano, uma vez que hidrolisam proteínas e lipídios, permitindo o desenvolvimento de micro-organismos (INDUMATHI et al., 2018).

Sob o ponto de vista químico, o leite é uma suspensão coloidal composta por proteínas e glóbulos de gordura dispersos em uma fase sérica contínua composta principalmente por água, sais minerais, lactose e proteínas do soro. Sob o ponto de vista biológico, o leite é a secreção das glândulas mamárias de mamíferos após o nascimento da cria. Ainda, de acordo com o Regulamento de Inspeção Industrial dos Produtos de Origem Animal (RIISPOA), entende-se por leite, sem outra especificação, o produto oriundo da ordenha completa e ininterrupta, em condições de higiene, de vacas sadias, bem alimentadas e descansadas. O leite de outros animais deve denominar-se segundo a espécie de que proceda (BRASIL, 2017).

Devido a sua alta susceptibilidade ao crescimento microbiano, tratamentos de estabilização são necessários para inativar micro-organismos deteriorantes e patogênicos, bem como a inativação de enzimas nativas responsáveis por sua degradação, buscando um produto inócuo e de alta qualidade capaz de promover a saúde de seus consumidores (SCUDINO et al., 2020).

O tratamento térmico é a operação unitária mais comum e amplamente utilizada para pasteurização e esterilização na indústria de alimentos. Convencionalmente, a pasteurização é usada para eliminar os micro-organismos patogênicos e garantir que o leite esteja seguro para consumo humano. No entanto, durante o tratamento térmico, para conferir estabilidade e segurança ao leite e produtos lácteos, os constituintes do leite sensíveis ao calor sofrem muitas modificações físicas e químicas, que alteram as propriedades sensoriais (textura, aroma e sabor) e nutricionais (perdas de vitaminas) dos produtos processados (BARBA et al., 2016; AMARAL et al., 2017).

A demanda do consumidor por produtos de maior qualidade, que preservem propriedades sensoriais e nutricionais, inspira pesquisadores e a indústria de alimentos a investigar novas tecnologias de processamento para substituir os

tradicionais métodos de processamento (AWUAH; RAMASWAMY; ECONOMIDES, 2007). Estas técnicas convencionais têm sido substituídas por tecnologias emergentes não térmicas, que normalmente envolvem menores tempos de processamento, menores consumo de água e energia, menor produção de efluentes residuais e compostos tóxicos, além de preservar as características nutricionais e os aspectos sensoriais dos produtos alimentícios (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011; CHANDRAPALA et al., 2012a).

Algumas tecnologias inovadoras usados no processamento de alimentos incluem extração por fluido supercrítico, processamento de alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado, plasma frio, ultrassom e irradiação ultravioleta (SINGLA; SIT, 2021).

A maioria dos efeitos negativos do tratamento térmico pode ser reduzida pelo uso de processos não térmicos, resultando em um produto alimentar com melhor qualidade. Vários processos não térmicas são frequentemente chamadas de pasteurização a frio, o que garante a segurança do produto, retém os atributos nutricionais dos alimentos, com redução de tempo e custos de processamento (GHOSH, 2017). Além disso, a constante demanda do consumidor por produtos de melhor qualidade motiva o emprego de novas tecnologias em substituição aos métodos usuais.

2.2. Características de leite de diferentes espécies animais

O leite bovino é rico em carboidratos (principalmente lactose), lipídeos (ácidos graxos, fosfolipídios), caseína (α_{S1} -caseína, α_{S2} -caseína, β -caseína, κ -caseína), proteínas de soro de leite (β -lactoglobulina, α -lactalbumina, imunoglobulina, albumina de soro bovino, lactoferrina), enzimas (lactoperoxidase, catalase, proteinase, xantina oxidase, lipase lipoproteica, fosfatase alcalina, aldolase e amilase), vitaminas do complexo B, cobalamina e ácido ascórbico, vitaminas lipossolúveis (A, D, E e K) e minerais (cálcio, fósforo, magnésio, potássio, zinco e selênio) (WALSTRA, 1990; MCSWEENEY; FOX, 2013).

Em média, o leite tem como seus principais compostos 87,5% de água, 3,9% de lipídeos, 3,4% de proteínas, 4,8% de lactose e 0,8% de minerais. As proteínas classificadas como caseínas, correspondem a 80% do total, e as proteínas do soro representam 20%. Todas as caseínas encontram-se unidas ao fosfato de cálcio em um complexo esférico específico altamente hidratado, conhecido como micela de

caseína. A lactose é o carboidrato predominante, totaliza cerca de 50% dos sólidos encontrados no leite desengordurado, apresenta cerca de um quinto da doçura da sacarose, e contribui para o sabor característico do leite. O leite bovino tem os mais complexos lipídeos conhecidos. Os triacilglicerídeos representam, sem dúvida, a maior parte, correspondendo de 96% a 98% de seu total. Outros lipídeos presentes no leite incluem fosfolipídeos, colesterol, ácidos graxos livres, monoglicerídeos e diglicerídeos (WALSTRA; WOUTERS; GEURTS, 2005; DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

O leite de cabra apresenta propriedades nutricionais e terapêuticas que o tornam superior ao leite bovino, por exemplo, melhor digestibilidade, alcalinidade, proteínas de alto valor nutritivo, menor alergenicidade, entre outros. No entanto, no leite de cabra os glóbulos de gordura são menores e seus ácidos graxos possuem menor comprimento de cadeia quando comparados ao leite de vaca, o que melhora seu potencial digestivo. Também possui compostos que promovem a saúde, como peptídeos bioativos; ácidos linoleicos conjugados e oligossacarídeos (VERRUCK; DANTAS; PRUDENCIO, 2019). Outro fator marcante está relacionado às características sensoriais, especialmente o sabor e o aroma típicos, que são responsáveis pela aceitação ou rejeição dos produtos por parte dos consumidores (GARCIA; TRAVASSOS, 2012).

O leite de búfala apresenta características que o diferenciam de qualquer outro tipo de leite. Seus valores de sólidos totais, proteínas, lipídeos, resíduo mineral fixo e lactose, são de grande importância nutricional, principalmente para crianças e adultos. Particularmente, os lipídeos constituem a principal fração do leite de búfala e é responsável por seu alto valor energético e nutritivo, adquirindo uma grande importância em países com rebanhos expressivos desse animal (MÉNARD et al., 2010).

A ausência do β -caroteno na composição química do leite de búfala é uma de suas características mais marcantes, conferindo-lhe coloração branca. É importante ressaltar que a ausência dessa substância, não é considerada um problema nutricional, apesar deste alimento ser considerado um precursor de vitamina A, visto que o mesmo é rico nesta vitamina (SILVA, 2014).

O leite de búfala apresenta maior teor de sólidos que o leite bovino, que o torna interessante para elaboração de derivados, tais como leite fermentado e queijos, uma vez que aumenta a consistência ou o rendimento dos produtos. Outra

característica importante é que possui um sabor bem adocicado, apesar de não possuir mais lactose que o leite bovino (MACEDO et al., 2001).

A maior parte do leite de ovelha produzido no mundo é processado para fabricação de queijos, iogurtes e outros produtos lácteos. Por esse motivo, a relação entre nutrição da ovelha e qualidade do leite é avaliada principalmente em termos de suas propriedades tecnológicas e de coagulação, que são marcadamente afetadas pelos teores de lipídeos e de proteína do leite e pela contagem de células somáticas (CSS) (PULINA et al., 2018). Estes componentes e a CCS também têm um grande impacto no rendimento e na qualidade dos produtos lácteos (NUDDA et al., 2020).

De um modo geral, a composição do leite varia devido a fatores relacionados aos animais (espécie, idade, antecedentes genéticos incluindo raça e características individuais dos animais, número de lactações, estágio de lactação, saúde); práticas agrícolas (sistema de manejo, dieta, número de descendentes) e fatores ambientais (solo, clima, altitude) (CHIA et al., 2017).

2.3. Uso de ultrassom em produtos lácteos

O ultrassom (US) é considerado uma tecnologia não térmica emergente para processamento de alimentos, devido à sua capacidade de promover alterações físicas e químicas nos alimentos sem a aplicação de aquecimento (ORTEGA-RIVAS; SALMERÓN-OCHOA, 2014).

Os desenvolvimentos na aplicação do US no processamento datam dos anos anteriores à Segunda Guerra Mundial, quando o US foi investigado para uma série de tecnologias, incluindo emulsificação, entre outras (MASON, 2003). Os primeiros avanços na exploração do US na indústria de alimentos foram alcançados no final do século XX (POVEY; MCCLEMENTS, 1988; DEMIRDÖVEN; BAYSAL, 2009), sendo suas principais características o baixo custo, simplicidade e economia de energia (BERMÚDEZ-AGUIRRE; MOBBS; BARBOSA-CÁNOVAS, 2011).

Por muito tempo, na área de alimentos o US era utilizado para realização de análises não destrutivas, principalmente relacionadas à avaliação de qualidade e tais aplicações usam alta frequência (100 kHz – 1 MHz) e baixa potência (normalmente $< 1 \text{ W.cm}^{-2}$) (DEMIRDÖVEN; BAYSAL, 2009).

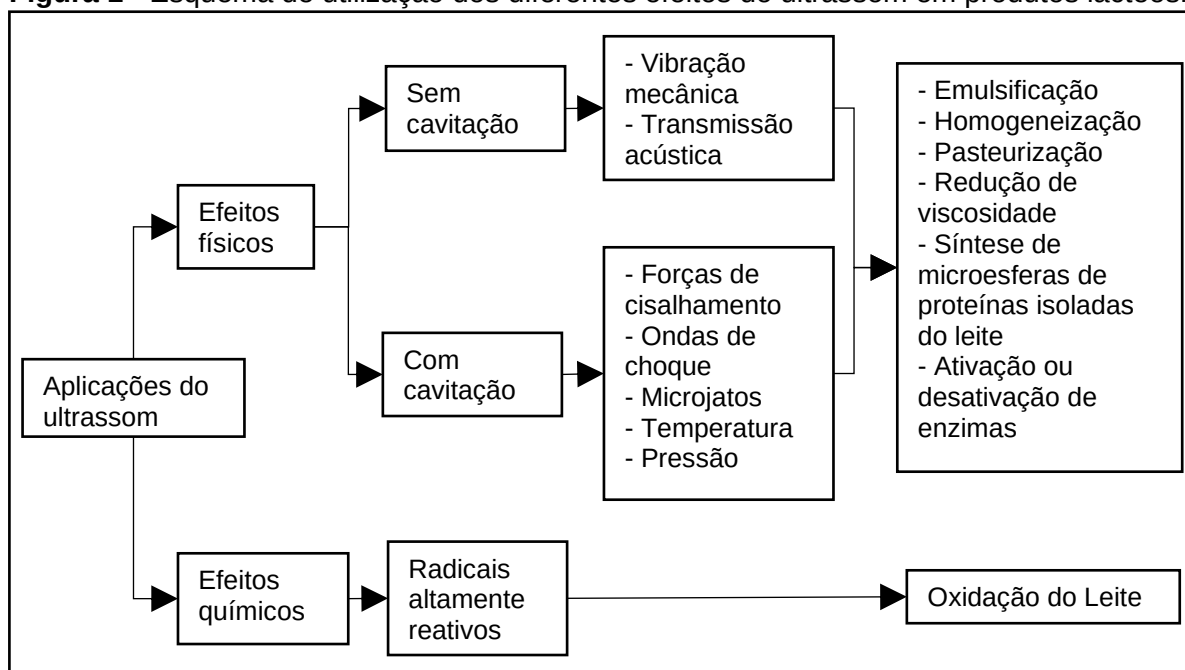
As ondas de US de alta intensidade e baixa frequência são caracterizadas como disruptivas e, portanto, induzem efeitos consideráveis nas propriedades físicas, bioquímicas e mecânicas dos produtos alimentícios em contraste com o US de baixa

potência. Sua frequência varia de 20 a 100 kHz enquanto as intensidades estão na faixa de 10 a 1000 W/cm². Isso tem ampla aplicação em emulsificação, antiespumante, regulação de microestruturas e modificação de atributos de textura de produtos gordurosos, sonocristalização e propriedades funcionais de proteínas alimentares. Também tem aplicações significativas em inúmeras operações unitárias de congelamento, secagem, amaciamento, concentração e descongelamento (BHARGAVA et al., 2021).

O US é uma das tecnologias que pode ser usada para aumentar a vida útil e a processabilidade do leite (RODRÍGUEZ et al., 2003). Uma vantagem é obter melhor homogeneização do leite usando US em comparação com o método convencional (BERMÚDEZ-AGUIRRE; MOBBS; BARBOSA-CÁNOVAS, 2011). Adicionalmente, esta tecnologia não térmica pode ser aplicada para minimizar o processamento, melhorar a qualidade e garantir a segurança dos produtos alimentícios (AADIL et al., 2013; HUANG et al., 2017; MANZOOR et al., 2019; ZIA et al., 2019).

Os efeitos químicos e físicos do US em leite resultam em uma gama de alterações nas diferentes proteínas do leite e na atividade enzimática, que podem ser úteis ou prejudiciais para o processamento de leite nas indústrias de laticínios, tais como as representadas na Figura 1 (MUNIR et al., 2019).

Figura 1 - Esquema de utilização dos diferentes efeitos do ultrassom em produtos lácteos.



A sonicação do leite resulta em uma diversidade de alterações físico-químicas nas macromoléculas, incluindo inativação enzimática, homogeneização (VILLAMIEL; DE JONG, 2000), redução no tempo de fermentação durante a preparação do iogurte (WU; HULBERT; MOUNT, 2000), além de melhoria nas propriedades reológicas do iogurte (VERCET et al., 2002). Embora muitos micro-organismos patogênicos e deteriorantes sejam facilmente destruídos sob tratamentos térmicos padrões, muitos deles produzem lipases e proteases extracelulares, que podem resistir ao tratamento UHT (STEAD, 1986). Essas enzimas termo resistentes podem reduzir a qualidade e a vida útil do leite tratado termicamente e dos derivados lácteos. As ondas de US têm efeito significativo nas enzimas, levando à ativação ou inativação enzimática, em função das propriedades fisiológicas das enzimas e das condições de tratamento (NADAR; RATHOD, 2017).

A desnaturação de proteínas é o principal mecanismo de inativação enzimática, que pode ocorrer pela produção de uma força de cisalhamento resultante do colapso de bolhas de cavitação ou pela formação de radicais livres por sonólise de moléculas de água (O'DONNELL et al., 2010).

Dependendo da intensidade do US, a viscosidade dos alimentos pode aumentar ou diminuir, sendo o efeito temporário ou permanente. A cavitação causa cisalhamento, que no caso de fluidos tixotrópicos (fluidos cuja viscosidade aparente diminui com o aumento do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, em função da quebra estrutural, tais como leite condensado e iogurtes) causa uma redução temporária da viscosidade. Em alguns produtos, quando aplicada uma energia suficiente, a estrutura é quebrada irreversivelmente, com redução do peso molecular, dando origem a uma redução permanente da viscosidade (SESHADRI et al., 2003).

O cisalhamento acústico (tratamento com US a 20 kHz e 31 W) pode desnaturar as proteínas do soro em tempos de tratamento relativamente curtos (~ 5 min), expondo resíduos hidrofóbicos ao meio externo, uma vez que interações hidrofóbicas e pontes de hidrogênio estão presentes na estrutura terciária destas proteínas. Entretanto, o tratamento prolongado (> 10 min) levou à agregação da proteína do soro de leite por meio de interações hidrofóbicas (CHANDRAPALA et al., 2011). O desdobramento induzido pelo US e mudanças conformacionais semelhantes das proteínas do soro também foram relatados (GÜLSEREN et al., 2007; ARZENI et al., 2012). Mais recentemente, Silva, Zisu, e Chandrapala (2018) estudaram mudanças na estrutura secundária das proteínas do soro de leite causadas por US (20 kHz, 75,6

J/mL) em sistemas ricos em proteínas do soro. Eles observaram que a sonicação induz a desnaturação das proteínas, seguida pela formação de novos agregados, com estruturas de β -folhas e enoveladas.

Em um estudo interessante, Lopez e Burgos (1995a) relataram que a manotermossonicação (aplicação de US com calor e pressão) pode inativar a enzima peroxidase. Quando comparados ao tratamento térmico (126,5 °C), houve uma redução acentuada na atividade enzimática em pH neutro quando as enzimas foram pré-tratadas com US (126,5 °C a 20 kHz) em pressão elevada (3,5 kg/cm²). Provavelmente a divisão do grupo prostético heme da enzima ou a desnaturação da apoenzima nas condições utilizadas poderia ser a razão para a inibição da enzima (LOPEZ; BURGOS, 1995b). Tratamentos de mano-termo-sonicação semelhantes aplicados à lipoxigenase também se mostraram promissores na inibição da atividade enzimática (LOPEZ; BURGOS, 1995a).

Apesar das vantagens do US, suas desvantagens incluem a geração de radicais livres durante o tratamento, que podem alterar as proteínas, aminoácidos e lipídeos, catalisando reações indesejáveis (ARVANITOYANNIS; KOTSANOPOULOS; SAVVA, 2017).

A desnaturação extensiva de proteínas e lipólise durante a sonicação pode resultar em sabores estranhos no leite (CHOULIARA et al., 2010) e afetar características de textura, como espalhabilidade em queijos cremosos (ALMANZA-RUBIO et al., 2016).

Em um estudo de Marchesini et al. (2012) com US de 400 W e 24 KHz aplicado em leite cru, revelou um aumento significativo de um sabor estranho de queimado com o aumento da intensidade e duração do tratamento de US. Entretanto, com a adição de CO₂, o sabor estranho de queimado diminuiu, porém o gosto ácido aumentou. O tempo de sonicação de 200 s resultou em maior alteração, com produção de sabores metálicos e queimados, textura borrachuda e sensação cortante, detectados por 23,2, 44,6, 30,4 e 19,6% dos avaliadores, respectivamente, levando à rejeição do leite. Ainda no mesmo estudo as propriedades de coagulação do leite sonicado foram dramaticamente melhoradas após os tratamentos de ultrassom (US), indicando um possível uso para US na indústria de fabricação de queijo.

Utilizando o US para inativação de micro-organismos, Marchesini et al. (2015) sonicaram leite cru na intensidade de 400 W por 300 s, e constataram a inativação de *E. coli*, *P. fluorescens* e *D. hansenii*. A duração do tratamento também reduziu a

população de micro-organismos, embora a sonicação por mais de 100 s levasse à deterioração sensorial do leite, devido para a formação de sabores estranhos. Em outra etapa deste estudo, o tratamento com US resultou na produção de compostos voláteis, tais como ácido dodecanóico, ácido octanóico, δ -dodecalactona e éster metílico do ácido decanóico, que foram significativamente relacionados a sabores estranhos metálicos, queimados, textura borrachuda e sensação cortante, respectivamente. Estes compostos podem ser usados como marcadores de alterações sensoriais causadas por sonicação.

Roselli et al. (2018) relataram que os consumidores estão interessados em comprar alimentos tratados com US (a um preço comparável aos alimentos tradicionalmente preparados), prevendo futuramente um aumento na aplicação de US no processamento de alimentos, quando os clientes estiverem melhor informados sobre os benefícios deste processamento.

2.4. Propriedades Físicas

As propriedades físicas do leite constituem fatores importantes para definição das condições de processamento do leite para a elaboração dos produtos lácteos. Na maioria dos tratamentos, tanto térmicos como os considerados “não térmicos”, para o dimensionamento dos equipamentos envolvidos nos processos de conservação é necessário o conhecimento das propriedades termofísicas dos alimentos, tais como: densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica (GUT; SONG, 2016).

Na literatura é possível encontrar uma coletânea de dados referentes as essas propriedades termofísicas de diferentes produtos alimentícios, incluindo leite e derivados, bem como equações preditivas que correlacionam tais propriedades com a temperatura, composição química, teor de sólidos, entre outros fatores (POLACHINI et al., 2016, 2017; DE CASTILHOS et al., 2017, 2018; COSTA; SILVA; VIEIRA, 2018; EVANGELISTA et al., 2020; MARTINS et al., 2020).

Os principais constituintes do leite (sólidos totais, lipídeos, proteína e lactose) e as propriedades físicas, estão relacionados entre si e definem métodos de fabricação, parâmetros de projeto, melhor produto final para determinado conjunto de características, custo do processo, entre outros.

Todo processo de transformação de leite em produtos derivados, ou mesmo apenas a pasteurização e esterilização, depende do comportamento das propriedades

físicas, principalmente nos processos termofísicos, onde a variação de temperatura, seja por fonte externa ou pela fermentação, influenciará na mudança de valores de calor específico e viscosidade.

Em processos que utilizam o US, a composição do leite de diferentes espécies influencia as propriedades físicas e, conseqüentemente, na determinação do campo acústico, ressaltando a necessidade de estudos desta natureza.

2.4.1. Calor específico

O calor específico tem valor significativamente afetado pela quantidade e pelo estado físico da água presente no material (LEWIS, 1993). A capacidade calorífica ou calor específico (C_p) é uma propriedade termodinâmica fundamental que desempenha importante papel em processos que envolvem adsorção, liberação ou transferência de calor. No que diz respeito ao processamento industrial de alimentos, o calor específico está presente no dimensionamento de equipamentos envolvidos em operações unitárias que conferem trocas térmicas, tais como: esterilização, pasteurização, secagem, refrigeração e congelamento (HU et al., 2009).

Na ausência de dados de calor específico para determinado alimento, uma alternativa consiste na utilização das equações preditivas, tal como as propostas por Choi e Okos (1986) (Quadro 6), que são as mais utilizadas para cálculo de equipamentos, as quais relacionam as propriedades termofísicas em função da temperatura e da composição do alimento, onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), C_{p_i} é o calor específico do componente i ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{^{\circ}C}^{-1}$) e X_i a fração mássica do componente i .

O valor do calor específico também é usado na determinação do campo acústico real em processos que envolvem a tecnologia de ultrassom de potência, uma vez que parte da potência de entrada é convertida pelo equipamento de US em potência acústica no produto (POLACHINI; CARVALHO; TELIS-ROMERO, 2017; GUIMARÃES et al., 2020; POLACHINI et al., 2021a).

Quadro 6 – Equações preditivas para calor específico dos principais componentes dos alimentos ($0 \leq T \leq 150^\circ$).

Propriedade	Equação por componente (T em °C)	
Calor específico (Cp) [kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]	$C_{p_{proteínas}} = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3}T - 1,3129 \times 10^{-6}T^2$	(1)
	$C_{p_{lipídeos}} = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3}T - 4,8008 \times 10^{-6}T^2$	(2)
	$C_{p_{carboidratos}} = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3}T - 5,9399 \times 10^{-6}T^2$	(3)
	$C_{p_{fibras}} = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3}T - 4,6509 \times 10^{-6}T^2$	(4)
	$C_{p_{cinzas}} = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3}T - 3,6817 \times 10^{-6}T^2$	(5)
	$C_{p_{água}} = 4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5}T + 5,4731 \times 10^{-6}T^2$	(6)
	$C_p = \sum_{i=1}^6 X_i C_{p_i}$	(7)

Fonte: Choi e Okos (1986).

A determinação do campo acústico pode ser realizada por meio do método calorimétrico. Este método considera que o aumento da temperatura promovido durante a aplicação do US é uma consequência do processo de cavitação (MARGULIS; MARGULIS, 2003). Para tal determinação, deve-se empregar a Equação 8:

$$P_{acústica} = m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

em que $P_{acústica}$ é a potência acústica (W), m é a massa de líquido (kg), C_p é o calor específico do líquido (J.kg⁻¹.°C⁻¹) e dT/dt é a taxa de aquecimento (°C.s⁻¹).

Hu et al. (2009) determinaram modelos matemáticos que representassem o calor específico do leite como função da temperatura (1 a 59 °C) e teor de lipídeos. Contudo, os modelos empregados apresentavam elevadas ordens (polinômios de sexta e sétima ordens), o que pode tornar mais complexa a utilização do modelo. Por outro lado, Minim et al. (2002) determinaram um modelo linear para representar as propriedades físicas do leite de vaca, empregando três variáveis combinadas: o conteúdo de água, o conteúdo de lipídeos e a temperatura.

A técnica analítica da Calorimetria Diferencial de Varredura (Differential Scanning Calorimetry, DSC) foi utilizada para determinação da capacidade calorífica, sendo considerada a principal técnica e largamente utilizada em análise térmica da grande maioria dos materiais nas diversas áreas. As diferenças de potência fornecida

para amostra em relação à referência são medidas em função da temperatura ou do tempo. Este método tem sido considerado uma escolha adequada para medir o calor específico (C_p) em função da temperatura porque é relativamente simples, rápido e aplicável às análises de amostras contendo baixa e alta umidade (SÁNCHEZ-ROMERO et al., 2021).

As condições experimentais ideais para determinação do calor específico por DSC, são muito importantes para resultados com menores erros e variações. A taxa de aquecimento e o tamanho da amostra são as principais fontes de erro que afetam a sensibilidade do instrumento durante a determinação de C_p usando DSC (DARROS-BARBOSA; BALABAN; TEIXEIRA, 2003). Utilizando-se os dados experimentais, normalmente utiliza-se regressão linear para se obter equações que relacionem calor específico com temperatura.

2.4.2. Viscosidade e parâmetros reológicos

O termo reologia foi criado como derivação do termo grego “*rheos*” que significa fluir. A reologia é o estudo do escoamento e deformação dos materiais, ou seja, como os materiais se comportam quando submetidos a alguma tensão ou deformação. Esta definição foi aceita desde a criação da Sociedade Americana de Reologia em 1929 (EGAWA, 2007)

O estudo do comportamento reológico da matéria se dá pela importância das propriedades reológicas em projetos de equipamentos como tubulações, bombas, trocadores de calor e evaporadores, no desenvolvimento de novos produtos e ingredientes, bem como sua funcionalidade, controle de qualidade e vida de prateleira, além de poder relacionar as características de textura de um produto com seu perfil sensorial (STEFFE, 1996).

De uma maneira geral, é possível classificar o comportamento reológico dos materiais, por meio de dois extremos idealizados: sólidos perfeitos (hookeanos) e fluidos perfeitos (newtonianos), a deformação ocorre em sólidos e o escoamento em líquidos. Enquanto os sólidos ideais se deformam, elasticamente, e a energia de deformação é completamente recuperada, quando cessa o estado de tensão, fluidos ideais escoam, ou seja, se deformam de forma irreversível e a energia de deformação é dissipada na forma de calor. Dessa maneira, em fluidos, a energia de deformação não é recuperada, após o alívio da tensão (PASQUEL, 1999; OLIVEIRA, 2017).

O corpo viscoso mais simples é o fluido newtoniano, para o qual a relação existente entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento resulta numa constante (CASTRO; DIOGO; COVAS, 2001). A viscosidade desses materiais é uma medida da sua resistência ao escoamento, ou seja, quanto maior a viscosidade, maior a resistência ao escoamento e é influenciada pela temperatura e sua composição (COSTA, 2014). Muitos alimentos como leite, suco de maçã (0-8 g de sólidos solúveis -SS/100 g de solução), extrato de carne (1,5-20 g de SS/100 g de solução), suco de laranja clarificado, água e suco de uva clarificado apresentam comportamento newtoniano (ZURITZ et al., 2005; POLACHINI et al., 2016; SALEHI, 2020).

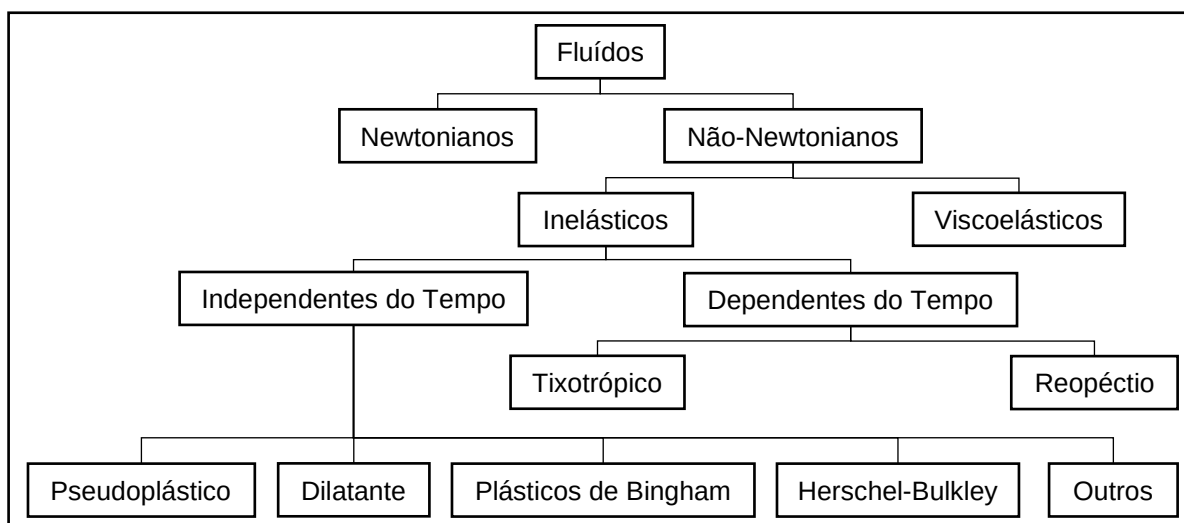
A resistência que o fluido oferece ao escoamento é caracterizada como a sua viscosidade newtoniana (μ), como mostra a Equação (9), entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, cuja equação passa pela origem (STEFFE, 1996).

$$\sigma = \mu \cdot \gamma \quad (9)$$

em que: σ é a tensão de cisalhamento (Pa), μ é a viscosidade Newtoniana (Pa.s) e γ é a taxa de deformação (s^{-1}).

A Figura 2 (TONELI; MURR; KIL, 2005) apresenta uma classificação geral do comportamento reológico de fluidos:

Figura 2 – Classificação do comportamento reológico de fluidos.



Os fluidos não-newtonianos viscoelásticos podem ser descritos como aqueles que apresentam, simultaneamente, propriedades de fluidos (viscosos) e de sólidos (elásticos). A textura é uma importante propriedade dos alimentos, pois é um indicador de qualidade e aceitabilidade. Existem várias análises para medir as propriedades de textura. Como os alimentos possuem comportamentos mecânicos semelhantes tanto aos líquidos quanto aos sólidos, sua reologia deve ser avaliada por meio das propriedades viscoelásticas (MIANO et al., 2017). Um exemplo de alimento que apresenta propriedade viscoelástica é a massa de biscoito (OLIVEIRA et al., 2021).

Nos fluidos não-newtonianos inelásticos, a viscosidade pode diminuir ou aumentar com o aumento da taxa de cisalhamento. Ainda, podem ser classificados como dependentes ou independentes do tempo de cisalhamento. Existem muitos exemplos e aplicações de fluidos inelásticos na vida cotidiana e na indústria alimentícia. Exemplos de alimentos que apresentam redução da viscosidade com o cisalhamento (*shear thinning fluids*) são ketchup de tomate, iogurte, chocolate líquido. Outros fluidos que apresentam esta característica incluem creme dental, loções hidratantes e esmaltes (HASSAN et al., 2022), enquanto uma mistura aquosa à base de amido de milho, trigo ou arroz, em concentração > 50% em água, apresentam aumento da viscosidade com o cisalhamento (*shear thickening fluids*) (KILBRIDE et al., 2019).

Na literatura é possível encontrar diversos outros modelos matemáticos que descrevem os mais variados comportamentos reológicos, dentre os mais aplicados para alimentos temos os modelos: Ostwald-De Waele (Lei da Potência), Herschel-Bulkley e Bingham.

O modelo de Ostwald-De Waele (Equação 10) representa a chamada Lei da Potência, onde κ é o índice de consistência e n é o índice de comportamento. Para $n = 1$, essa equação se reduz à lei da viscosidade de Newton com $\kappa = \mu$. Assim, o desvio de “ n ” da unidade indica o grau de desvio do comportamento newtoniano, sendo que, se $n < 1$ o comportamento é pseudoplástico e, se $n > 1$, dilatante (TONELI; MURR; KIL, 2005).

$$\sigma = \kappa \cdot \gamma^n \quad (10)$$

No estudo da reologia de produtos lácteos, o modelo da lei da Potência é frequentemente aplicado para descrever as propriedades de fluxo de iogurtes (ABU-

JDAYIL; MOHAMEED, 2002), iogurtes elaborados a partir de leite e soro concentrados por ultrafiltração (MAGENIS et al., 2006) e bebidas lácteas (PENNA; SIVIERI; OLIVEIRA, 2001). Este modelo foi utilizado por Abu-Jdayil e Mohameed (2002) para determinar os índices de consistência e de comportamento de fluxo de iogurtes utilizando as curvas de viscosidade.

O modelo de Herschel-Bulkley é uma forma modificada do modelo proposto por Ostwald-De Waele, conforme ilustra a Equação (11). Este modelo difere da Lei da Potência apenas pela existência de uma tensão residual (σ_0), ou seja, uma vez que a tensão aplicada ao fluido ultrapasse o valor da tensão residual, o material passa a se comportar de acordo com o modelo da Lei da Potência (TONELI; MURR; KIL, 2005). Alimentos com comportamento reológico conforme o modelo de Herschel-Bulkley incluem purê de banana, pasta de peixe picado (DITCHFIELD et al., 2006) e manteiga de cacau (MISHRA et al., 2021).

$$\sigma - \sigma_0 = \kappa \cdot \dot{\gamma}^n \quad (11)$$

O modelo de Bingham (Equação 12) representa o comportamento apresentado pelos fluidos classificados como Plásticos de Bingham, em que μ_{pl} é a viscosidade plástica. Assim como os materiais que seguem o modelo de Herschel-Bulkley, os Plásticos de Bingham caracterizam-se por apresentarem uma tensão residual, abaixo da qual se comportam como sólidos, alimentos como margarina, maionese e ketchup são bons exemplos de plásticos de Bingham (MORENO; DIALAMI; CERVERA, 2021). Para tensões superiores à tensão residual, no entanto, os fluidos apresentam um comportamento newtoniano. Isso equivale a apresentarem um comportamento de Herschel- Bulkley com $\kappa = \mu_{pl}$ (TONELI; MURR; KIL, 2005).

$$\begin{aligned} \sigma &= -\mu_{pl} \cdot \dot{\gamma} \pm \sigma_0 & \text{se } |\sigma| > \sigma_0 \\ \dot{\gamma} &= 0 & \text{se } |\sigma| \leq \sigma_0 \end{aligned} \quad (12)$$

Steffe (1996) também apresenta uma série de outros modelos que podem prever o comportamento da viscosidade de um fluido com a temperatura, com a concentração ou com a umidade.

Os dados reológicos nas indústrias de alimentos são importantes para determinar a funcionalidade de ingredientes no desenvolvimento de produtos, controle

de qualidade do produto final ou intermediário, determinação da vida de prateleira, avaliação da textura pela correlação com dados sensoriais, cálculo de engenharia de processos englobando uma grande quantidade de equipamentos, tais como: agitadores, extrusoras, bombas, trocadores de calor, tubulações ou homogeneizadores (LANNES; MEDEIROS; AMARAL, 2002).

Para Kristo, Biliaderis e Tzanetakis (2003), medidas reológicas são fundamentais para caracterizar a estrutura dos géis de leites fermentados. Em análises realizadas utilizando testes oscilatórios, os autores classificaram o iogurte como fluido viscoelástico. A viscosidade do iogurte é uma importante propriedade uma vez que determina sua qualidade e aceitabilidade. Ela pode ser influenciada pela concentração de proteínas, lipídeos, ácido láctico, presença ou não de exopolissacarídeos (JUMAH; SHAKER; ABU-JDAYIL, 2001; ORDÓÑEZ, 2005; AMATAYAKUL et al., 2006) e pelo tratamento térmico utilizado (SHAKER; JUMAH; ABU-JDAYIL, 2000).

A elasticidade é a propriedade física dos fluidos de maior interesse na reologia dos sólidos e sua resistência ao escoamento é a viscosidade. Ela é dependente da natureza físico-química da substância, da temperatura, da pressão, da taxa de cisalhamento e do tempo de aplicação do cisalhamento. Para definir a viscosidade em função de um desses fatores, os outros devem ser mantidos constantes e bem definidos (CASTRO, 2007).

Matrizes lácteas como leite e soro in natura ou concentradas apresentam diferentes comportamentos reológicos influenciados por diversos fatores, incluindo a temperatura, conteúdo de proteínas, lipídeos, sólidos totais, minerais, pré-tratamento térmico e tempo de retenção do concentrado no evaporador (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 1998; BIENVENUE; JIMÉNEZ-FLORES; SINGH, 2003a, 2003b; TRINH; HAISMAN; TRINH, 2007).

A viscosidade de produtos lácteos é uma importante propriedade que restringe a concentração máxima em operações tais como a evaporação e ultrafiltração, e é o fator que mais afeta o tamanho das partículas durante a atomização em *spray dryer*, e, portanto, a taxa de secagem e a distribuição de tamanho da partícula de pó (BIENVENUE; JIMÉNEZ-FLORES; SINGH, 2003a; MORISON; PHELAN; BLOORE, 2013). Para certos produtos, como creme de leite e leites fermentados, a viscosidade está diretamente relacionado com aceitabilidade sensorial.

O comportamento reológico dos produtos lácteos pode ser bastante diverso, dependendo da sua composição, microestrutura, e condições de processamento. Embora o leite frequentemente apresente comportamento newtoniano, o leite concentrado (>30% de concentração de leite desnatado) e o achocolatado apresentam comportamento pseudoplástico; manteiga e leite condensado têm comportamento viscoelástico, e leite humano, iogurte e sorvete têm comportamento tixotrópico (dependente do tempo) (MORISON; PHELAN; BLOORE, 2013; ALATALO; HASSANIPOUR, 2020; MEHDITABAR; RAZAVI; JAVIDI, 2020; SURAWEERA; WICHCHUKIT, 2020; QAISER et al., 2021; DIAS et al., 2022).

2.4.3. Campo acústico

Em tratamentos com US, a potência acústica transmitida a um meio é a energia responsável pelos efeitos sonoquímicos e a diferença da potência elétrica de entrada é atribuída à reflexão da onda de volta para o transdutor, ruído, aquecimento ou desgaste do processador ultrassônico. As ondas sonoras sofrem atenuação ao atravessarem um meio, portanto, para se descobrir a energia acústica é necessário levar em consideração a distância da sonda de US até a amostra. As propriedades e a homogeneidade do meio desempenham um papel relevante em função do modo como o US se propaga na amostra. Em síntese, as propriedades térmicas referem-se à capacidade do meio em absorver energia e transferi-la; por outro lado, a densidade e as propriedades viscosas afetam a transmissão da vibração e podem aumentar a resistência à ocorrência de cavitação (POLACHINI et al., 2021b).

Nesse contexto, considerando as vantagens e inúmeras possibilidades de aplicação de novas tecnologias para o aperfeiçoamento de processos existentes na indústria de lácteos, estudos envolvendo determinação de propriedades físicas, assim como aplicação da tecnologia de US em leite têm o potencial de ampliar o conhecimento na área de alimentos, visando a melhoria da qualidade do produto final.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivos gerais

Estudar as propriedades físicas (calor específico, viscosidade e campo acústico) do leite de diferentes espécies visando propor condições para aplicação de US ao leite cru recém ordenhado, a fim de melhorar sua conservação.

3.2. Objetivos específicos

O presente trabalho objetivou caracterizar algumas propriedades físicas de leite das espécies: vaca, cabra, búfala e ovelha, tais como:

- a) Calor específico, em diferentes temperaturas, propor um modelo matemático para descrever os dados experimentais, assim como comparar os modelos obtidos com equações baseadas na composição química (teor de sólidos, proteínas, lipídeos, cinzas e carboidratos), propostas por Choi e Okos (1986), para leite das quatro espécies.
- b) Viscosidade, em diferentes temperaturas, comparar os modelos Ostwald-De Waele, Bingham e Herchel-Bulkley e Lei de Newton, a fim de identificar qual melhor descreve o comportamento reológico, bem como propor um modelo matemático que correlacione temperatura e viscosidade, para leite das 4 espécies.
- c) Campo acústico, em diferentes distâncias em relação à sonda, medir a temperatura e, com o parâmetro de calor específico, determinar a potência efetiva no leite de vaca e cabra.
- d) Aplicação de US, utilizando o mesmo experimento para medir o campo acústico, realizar análises químicas de teor de Acidez, Lipídeos e Proteína, antes da aplicação do US, imediatamente depois da aplicação e após 7 dias sob refrigeração. Com estes 3 parâmetros avaliar a ação do US para o leite de vaca e cabra.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os experimentos de calor específico e viscosidade, as amostras de leite das quatro espécies (vaca, búfala, cabra e ovelha) foram coletadas por alunos da Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da UNESP, Câmpus de São José do Rio Preto/SP, no período de junho a agosto de 2015. O procedimento experimental para determinação da composição, calor específico e parâmetros reológicos das quatro espécies de leite ocorreu logo após as coletas e foi realizado pelos alunos do Laboratório de Medidas Físicas da UNESP, Campus de São José do Rio Preto/SP, sob responsabilidade do Professor Doutor Javier Telis Romero. Os dados obtidos naquela ocasião foram tratados matematicamente e incluídos neste trabalho.

Para os experimentos de campo acústico e aplicação de US, utilizou-se leite cru recém ordenhado de vaca e cabra, coletados em 2021 e 2022 em fazendas da região de São José do Rio Preto/SP.

4.1. Obtenção e caracterização das matérias primas

Para os experimentos de calor específico e viscosidade, foram realizadas 3 coletas ($n=3$) para cada espécie de leite, na Fazenda Santa Mônica, município de Jaborandi/SP. Em cada dia de coleta obteve-se 1 litro de leite de cada espécie (vaca, búfala, cabra e ovelha), totalizando 12 amostras.

As amostras de leite cru, refrigerado de 4 a 7°C após ordenha, foram acondicionadas em garrafas de vidro, previamente higienizadas e esterilizadas, e transportadas para o Laboratório de Medidas Físicas da UNESP, Campus de São José do Rio Preto/SP, onde foram armazenadas sob refrigeração a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ para posteriores análises, em no máximo 48 h para preservar as características originais de leite cru. As análises foram realizadas em triplicatas.

Para os experimentos de campo acústico e aplicação de US, as amostras de leite de vaca foram obtidas por doação da Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, município de Mirassolândia/SP e as amostras de leite de cabra foram obtidas por doação do Capril Rio Preto, no município de São José do Rio Preto/SP. Foram realizadas 3 coletas ($n=3$) para cada espécie de leite, onde em cada dia de coleta obteve-se 3,5 litros de leite de cada espécie (vaca e cabra), totalizando 6 amostras. As análises foram realizadas em triplicatas.

4.2. Composição química do leite de diferentes espécies

As amostras de leite dos experimentos de calor específico e viscosidade foram caracterizadas quanto à sua composição química (teor de sólidos, proteínas, lipídeos, cinzas e carboidratos). O teor de sólidos foi determinado pelo método gravimétrico em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingir peso constante (IAL, 2008) (método 012/IV). O teor de proteínas foi determinado pelo método de Kjeldahl (AOAC INTERNATIONAL, 2005) (método 991.20). O conteúdo de lipídeos foi determinado pela leitura direta do percentual de lipídeos usando o butirômetro de Gerber (AOAC INTERNATIONAL, 2005) (método 2000.18). O conteúdo de cinzas foi determinado por meio de incineração em mufla (AOAC INTERNATIONAL, 2005) (método 935.42) e o teor de carboidratos foi calculado por diferença.

Para avaliação dos efeitos da aplicação do ultrassom no leite, foram realizadas análises de lipídeos por leitura direta do percentual usando butirômetro de Gerber (AOAC INTERNATIONAL, 2005) (método 2000.18), teor de proteína por análise indireta por aplicação de ultrassom de baixa potência utilizando aparelho Ekomilk (modelo M, fabricante: Bulteh 2000 Ltd., Stara Zagora, Bulgária, Figura 3) e acidez titulável expressa em $^\circ\text{Dornic}$ (BRASIL, 2006). As amostras foram avaliadas no dia da ordenha e aplicação de US (D+0) (tratamento US realizado no mesmo dia da ordenha) e após 7 dias (D+7) sob refrigeração a 4°C . Para efeito comparativo foram realizadas as mesmas análises para leite cru e leite submetido a pasteurização lenta, por aquecimento indireto do leite entre 63°C e 65°C por trinta minutos, sob agitação mecânica (BRASIL, 2017).

Figura 3 – Ekomilk M.



4.3. Determinação do calor específico e modelagem matemática

A capacidade calorífica do leite de diferentes espécies foi determinada pela técnica de calorimetria diferencial de varredura (DSC), utilizando um DSC 8000 (Perkin Elmer, Shelton, CT, Figura 4), em uma ampla faixa de temperatura, que simulam as condições de processamento térmico do leite (1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 °C).

Figura 4 - DSC 8000, Perkin Elmer.



O equipamento DSC foi previamente calibrado com índium (Temp. Fusão: 156,6°C, $\Delta H_{\text{fusão}} = 28,45 \text{ J/g}$) em uma taxa de aquecimento de $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. A purga foi realizada com o gás nitrogênio (pureza de 99,5%) a uma taxa de aproximadamente $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. Painéis de alumínio para líquidos pesando $24,01 \pm 0,04 \text{ mg}$ (ref. 0219-0062, Perkin Elmer, EUA) foram usadas como linha de base e também como recipientes para discos de safira de 3 mm de diâmetro (ref. 0219-1268, Perkin Elmer, Shelton, USA), como material de referência na calibração da taxa de aquecimento (ARCHER, 1993). Foram utilizados 5 μL de amostra, sendo acondicionadas nas painéis de alumínio, o qual foram seladas e previamente pesadas antes de cada procedimento experimental. A linha base, material de referência e as amostras foram submetidos ao seguinte procedimento sequencial: isotérmico $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 min, taxa de aquecimento a $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ até $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e isotérmico a $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 min, conforme a metodologia descrita pela (ASTM INTERNATIONAL, 2011) (método E1269-11). Para análise dos dados, foi empregado o software PYRIS 11.0 (Perkin Elmer, Shelton, USA). Os valores de calor específico das amostras de leite foram determinados empregando a Equação 13:

$$c_p = \frac{D_s}{W_s \cdot \theta} \quad (13)$$

em que D_s é a potência térmica do respectivo material de referência em determinada temperatura (mW), W_s é a massa da amostra (mg) e θ representa a taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$).

Os valores médios do calor específico do leite de diferentes espécies foram utilizados para realizar a modelagem matemática dos dados. A Equação 14 representa a forma geral de polinômio de terceira ordem. Para tal análise, regressões não lineares utilizando o software OriginPro 2016 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) foram realizadas. A qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais e a escolha do melhor modelo foi realizada por meio dos seguintes parâmetros estatísticos, obtidos pelo próprio software matemático: coeficiente de determinação ajustado (R_{Adj}^2) e χ^2 reduzido. Valores de R_{Adj}^2 próximos de um e χ^2 reduzido próximos de zero indicam melhor acuracidade do modelo aos dados experimentais (VEGA-GÁLVEZ et al., 2010). Os resultados obtidos pelo modelo escolhido foram comparados aos resultados obtidos pelo modelo de Choi e Okos (1986) (Equação 7), empregando o erro médio relativo (EMR), conforme a Equação 15:

$$c_{pi} = \phi_1 + \phi_2 T + \phi_3 T^2 + \phi_4 T^3 \quad (14)$$

em que C_{pi} é o calor específico do leite da espécie i ($\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{^{\circ}\text{C}}^{-1}$), ϕ_i é a constante empírica do modelo e T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

$$\text{EMR}(\%) = \frac{|C_{\text{pobservado}} - C_{\text{pobtido}}|}{C_{\text{pobservado}}} \times 100 \quad (15)$$

em que EMR é o erro médio relativo (%), $C_{\text{pobservado}}$ é calor específico obtido pelo modelo matemático e C_{pobtido} é o calor específico obtido pela equação de Choi e Okos (1986).

Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão para composição química do leite e calor específico. Os dados submetidos a Análise de Variância (ANOVA) seguido do teste de comparação múltipla de Tukey ao nível de significância 5%. As análises estatísticas foram realizadas no software Minitab 17 (Lead Technologies, State College, PA, USA).

4.4. Determinação dos parâmetros reológicos e modelagem matemática

As medidas reológicas de cisalhamento foram realizadas utilizando-se um reômetro rotacional modelo ARG2 (TA Instruments, New Castle, EUA, Figura 5), acoplado com cilindros de geometria concêntricos (cilindro interno de 42 mm × 28 mm; cilindro externo de 78,5 mm × 30,15 mm) com 5920 µm de distância entre os cilindros, com controle tensão e temperatura, esta última controlada por um sistema Peltier. O software Rheology Advantage operou o sistema, e o escoamento em regime permanente foi alcançado após cisalhamento das amostras por 2 min, tempo necessário para que a tensão de cisalhamento atinja valores constantes para cada taxa de cisalhamento estabelecida.

A taxa de cisalhamento variou de 0,84 s⁻¹ a 168,44 s⁻¹ em dez temperaturas diferentes (1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 °C) usando o leite das quatro espécies (vaca, búfala, cabra e ovelha). As análises foram realizadas em triplicata (n=3) para cada dia de coleta (k=3), totalizando 9 avaliações por espécie de leite. Cada taxa de cisalhamento fixa forneceu dados precisos de tensão de cisalhamento (Pa).

A avaliação reológica foi realizada na abordagem do estado estacionário, uma vez que, segundo Steffe (1996), é considerada a melhor forma de caracterizar o comportamento reológico dos fluidos alimentares.

A precisão do reômetro foi avaliada previamente de acordo com Neto et al. (2014), utilizando clorobenzeno e ácido acético (50:50 v/v) como soluções-padrão.

A descrição do comportamento reológico das amostras de leite de diferentes espécies foi ajustada utilizando o software Microsoft Excel versão 2016 (Microsoft, Redmond, Washington, Estados Unidos) para os modelos Newton, Ostwald-De Waele (Lei da Potência), Herschel-Bulkley e Bingham, descritos nas Equações 9, 10, 11 e 12.

O coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P) e raiz do erro quadrático médio (RQME) foram usados para constatar a consistência do modelo escolhido. Quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 , sendo o primeiro indicativo de consistência do modelo, mas este parâmetro sozinho não é suficiente para confirmar adequadamente (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996). Assim, a análise dos erros é necessária, se os valores de P forem menores que 10%, e quanto mais o valor de RQME se aproxima de zero, mais próximas as abordagens de predição dos dados experimentais são consideradas apropriadas para ajustar os dados de forma

satisfatória (MCLAUGHLIN; MAGEE, 1998; MCMINN, 2006; CANTU-LOZANO et al., 2013).

Uma vez escolhido o melhor modelo e testada sua consistência, a Temperatura foi relacionada com a Viscosidade. Para fluidos não-newtonianos, os modelos existentes são todos empíricos e representam o ajuste mais conveniente do reograma correspondente ao produto analisado (BRANCO, 1995; STEFFE, 1996). Em fluídos newtonianos a que melhor expressa a relação é a equação de Arrhenius, envolvendo a temperatura absoluta (T, em Kelvin), a constante universal dos gases ($R = 8,3145 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e a energia de ativação para a viscosidade (E_a), como mostra a Equação (16).

Os modelos polinomiais da equação de 2º grau, mostrado na Equação (17) e da Equação exponencial (Equação 18), também foram testados.

$$\mu = f(T) = A \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (16)$$

$$\mu = aT^2 - bT + c \quad \text{sendo } a, b \text{ e } c, \text{ constantes} \quad (17)$$

$$\mu = A \cdot e^{-bT} \quad \text{sendo } A \text{ e } b, \text{ constantes} \quad (18)$$

Os valores de E_a e da constante A são determinados a partir dos dados experimentais. Valores elevados de energia de ativação indicam maior dependência da viscosidade com a temperatura (TONELI; MURR; KIL, 2005).

O conhecimento da energia de ativação (E_a) e o parâmetro de ajuste (A) permite modelar matematicamente o comportamento reológico, bem como verificar os efeitos da temperatura sobre a viscosidade (GRATÃO; BERTO; SILVEIRA JÚNIOR, 2004). A E_a indica a sensibilidade da viscosidade devido à mudança de temperatura, em que maiores valores da E_a significam que a viscosidade é relativamente mais sensível à mudança de temperatura (PEREIRA; QUEIROZ; DE FIGUEIRÊDO, 2003).

Figura 5 - Reômetro rotacional modelo ARG2, TA Instruments.



4.5. Determinação do campo acústico e modelagem matemática

Os parâmetros acústicos foram determinados pelo método calorimétrico, que consiste na medição do aumento da temperatura em alguns pontos, nas amostras de leite de diferentes espécies, em intervalos de tempo pré-determinados. Durante o experimento, foi considerado que o sistema se comporta em condições adiabáticas (RASO et al., 1999).

Para avaliar o campo acústico resultante do tratamento de US foram realizados experimentos conforme um delineamento central composto (DCC) com 3 fatores ou variáveis independentes (potência da sonda, distância da sonda e tempo de aplicação), usando o processador ultrassônico Sonicador Sonics Vibra-Cell VCX 1500 (Fabricante: Sonics & Materials Inc, Newtown, USA), ilustrado na Figura 6.

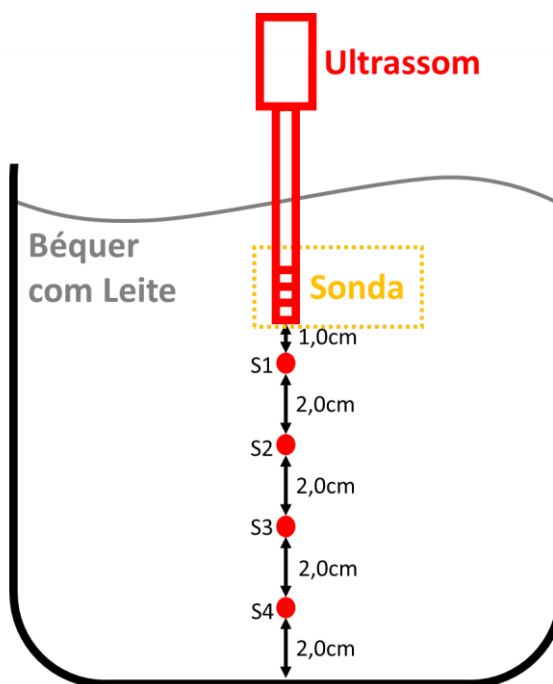
Figura 6 - Processador ultrassônico VCX 1500.



Os registros de temperatura foram realizados usando a configuração experimental ilustrada na Figura 7. A massa de leite usada em cada tratamento foi de

aproximadamente 1000 gramas e as variações de potência nominal foram 300, 500 e 700 W. A coleta das medidas de temperatura foi realizada a cada 28 segundos até atingir 616 segundos, perfazendo 23 medidas para cada sensor de temperatura. As distâncias dos sensores de temperatura (S1, S2, S3 e S4), em relação à sonda, em configuração vertical, foram de 1, 3, 5 e 7 cm. Para o cálculo da potência acústica foi utilizado a Equação 8.

Figura 7 - Esquema do experimento para medidas de campo acústico.



Utilizando 4 sensores do Termopar modelo Penta III (Fabricante: Full Cauge Controls, Miami, USA, Figura 8), foram coletadas as medidas de temperatura em cada sensor. Este aparelho oferece a leitura dos 4 sensores com intervalo automáticos no display de 4 s, ou seja, o S2 é mostrado 4 s depois do S1, e assim por diante nos demais sensores, porém as medidas de temperatura são instantâneas, conforme é mostrado no display. Desta forma, otimizando o experimento e a quantidade de leite utilizada, as medidas dos 4 sensores foram coletadas em um único experimento. Desta forma os tempos de medida para S1 foram: 0", 28", 56", até 616", para o S2 foram: 4", 32", 60", até 620", e assim por diante para os demais sensores. Para cada potência da sonda e cada espécie de leite, o experimento foi executado em triplicata.

Figura 8 - Temopar modelo Penta III.



Por meio de uma regressão linear, em cada sensor foi obtido um dT/dt , utilizado para o cálculo da potência efetiva em cada ponto, a fim de se verificar se todos os sensores apresentam valores semelhantes de dT/dt , caracterizando se a potência acústica é a mesma em toda amostra.

4.6 Aplicação de ultrassom em leite

Para avaliar o efeito do tratamento de US na qualidade do leite recém ordenhado, foi utilizado um experimento semelhante ao utilizado para determinação do campo acústico, com tempo de aplicação do US de 14 minutos nas potências 300, 500 e 700 W, conforme Figura 9. As temperaturas iniciais e finais das amostras foram avaliadas a fim de se verificar a ocorrência de termo-sonificação das amostras.

Os níveis das variáveis estão apresentados na Tabela 1. O ponto central codificado como “0” foi selecionado segundo dados disponíveis na literatura para aplicação de US em produtos lácteos (CHANDRAPALA et al., 2012b, 2012c; JULIANO et al., 2014; CUI et al., 2020; HEMAR et al., 2020; SCUDINO et al., 2020). Os níveis de variação codificados como -1 e +1 foram escolhidos para cobrir a região experimental conveniente. A massa de leite usada em cada tratamento foi de aproximadamente 1000 gramas, adicionada em béquer para sonicação (Figura 9).

Figura 9 – A) Arranjo experimental para tratamento de leite com ultrassom; B) Detalhe lateral dos sensores de temperatura; C) Detalhe frontal dos sensores de temperatura e da Sonda de Ultrassom.

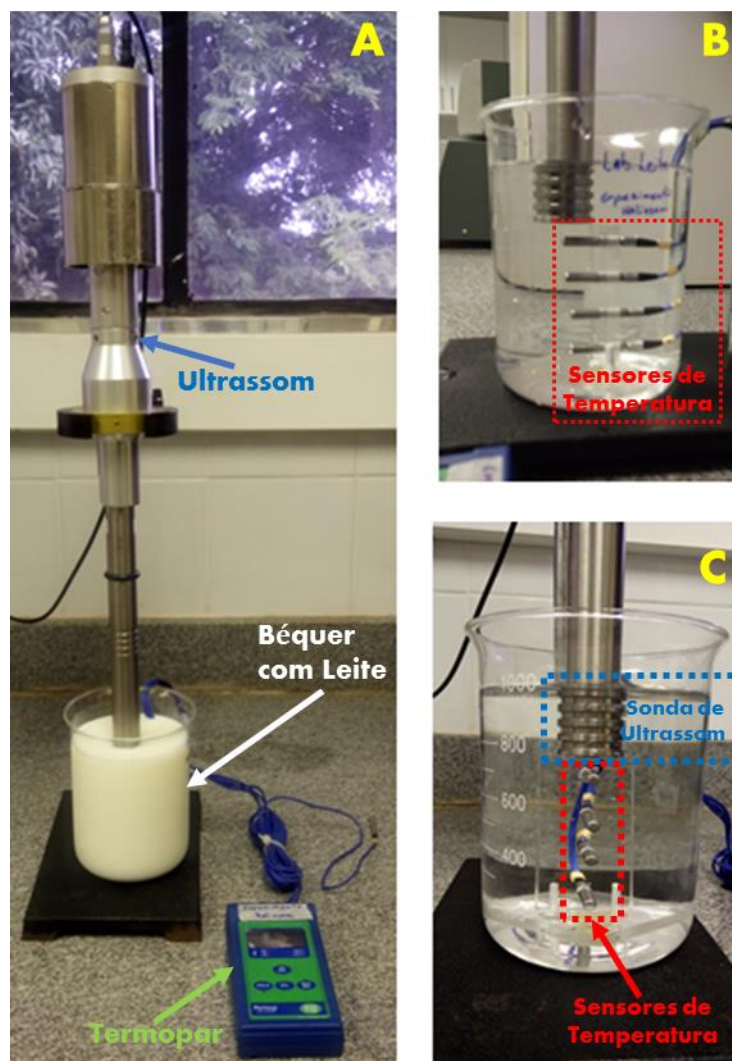


Tabela 1 - Variáveis e níveis de variação.

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
X= potência (W)	300	500	700

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Composição química do leite de diferentes espécies

A composição química do leite de vaca, de búfala, de cabra e de ovelha está apresentada na Tabela 2. Os valores de teor de sólidos das amostras de leite de diferentes espécies variaram em 6,62 g/100g de amostra, diferindo estatisticamente ($P < 0,001$) entre si. O leite de cabra apresentou os menores teores de sólidos, enquanto o leite de ovelha apresentou os maiores valores. Com relação aos teores de lipídeos, o leite de ovelha e de búfala apresentaram aproximadamente o dobro do teor obtido no leite de vaca e cabra. As amostras de leite de todas as espécies diferiram estatisticamente ($P < 0,001$) quanto aos teores de lipídeos presentes em sua composição. Quanto aos teores de proteínas, o leite de ovelha apresentou o maior valor, estando em média, 77% maior que o leite das demais espécies, com diferença estatística significativa ($P < 0,001$). A variação de teor de cinzas do leite das diferentes espécies, foi menor quando comparado com os demais componentes, também apresentando diferença estatística significativa ($P < 0,001$). Em relação aos carboidratos, o maior conteúdo foi identificado no leite de vaca, porém apenas 5%, em média, maior que nas demais espécies. Os teores de carboidratos das amostras apresentaram diferença significativa ($P < 0,001$), exceto para leite de búfala e de cabra.

Tabela 2 – Composição química do leite de diferentes espécies (g/100 g de amostra).

Componente	Vaca	Búfala	Cabra	Ovelha	Valor P
Teor de Sólidos	11,74 ± 0,03 ^c	15,21 ± 0,06 ^b	11,32 ± 0,05 ^d	17,94 ± 0,03 ^a	< 0,001
Lipídeos	3,37 ± 0,02 ^c	6,91 ± 0,03 ^b	3,09 ± 0,02 ^d	7,44 ± 0,04 ^a	< 0,001
Proteínas	3,11 ± 0,03 ^b	3,11 ± 0,02 ^b	3,08 ± 0,02 ^c	5,48 ± 0,03 ^a	< 0,001
Cinzas	0,69 ± 0,01 ^c	0,73 ± 0,01 ^b	0,69 ± 0,01 ^c	0,89 ± 0,01 ^a	< 0,001
Carboidratos	4,58 ± 0,03 ^a	4,47 ± 0,06 ^b	4,46 ± 0,06 ^b	4,13 ± 0,02 ^c	< 0,001

Letras minúsculas diferentes na mesma linha, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$).

A composição química do leite das diferentes espécies, determinada no presente estudo, é semelhante aos dados relatados na literatura (SHAKERIAN; KIANI; EHSANI, 2016). O leite de búfala destaca-se pelo alto teor de lipídeos, e é amplamente empregado na produção de queijos, desta forma, o conhecimento da sua composição

é essencial para o controle da produção. Apesar de apresentar conteúdo de proteínas próximo ou similar ao leite de vaca, as frações de micelas de caseínas que compõem o leite de búfala se diferem, pois o leite bubalino pode apresentar até duas vezes mais as frações de α_{s2} -caseína e β -caseína e baixas concentrações de α_{s1} -caseína (FOX, 2003; FELIGINI et al., 2009; SHAKERIAN; KIANI; EHSANI, 2016).

Em geral, o conteúdo de proteínas no leite de cabra é inferior ao leite de vaca (CRUZ et al., 2016; DELGADO JÚNIOR; SIQUEIRA; STOCK, 2020). Os resultados obtidos no presente estudo estão em acordo com os reportados na literatura quando comparado com o leite de cabra e de vaca. Apesar do baixo conteúdo de proteína para o leite de cabra, as micelas de caseínas constituinte do leite de cabra são formadas principalmente pela β -caseína, que representam aproximadamente 53% do total de caseínas, o que no leite de vaca não chega a 40% (DELGADO JÚNIOR; SIQUEIRA; STOCK, 2020). O leite de cabra possui grandes quantidades das frações α_{s2} -caseína e κ -caseína, conteúdo semelhante ao encontrado no leite de vaca, porém a fração α_{s1} -caseína é menor no leite caprino em comparação ao leite bovino. Há estudos que relacionaram o menor potencial alergênico do leite caprino, devido seu baixo conteúdo da fração α_{s1} -caseína, sendo tolerável para crianças com alergias ao leite de vaca (CRUZ et al., 2016). Além disso, o leite de cabra compartilha muitas características essenciais com o leite materno humano e, portanto, tem sido relatado como um dos substitutos mais importantes para o leite materno (LIU; ZHANG, 2022).

Os resultados obtidos para a composição química do leite de ovelha estão em concordância com dados relatados na literatura (TICIANI et al., 2013; MERLIN JUNIOR et al., 2015). De acordo com Morand-Fehr et al. (2007), a composição química do leite de ovelha depende de fatores de produção que constituem o sistema de criação: características sanitárias e genótipos dos animais, condições agroclimáticas, ambiente social e econômico e métodos de alimentação e ordenha. Tais fatores podem contribuir direta ou indiretamente nas características químicas do leite.

5.2. Calor específico e modelagem matemática

Os resultados do calor específico do leite de diferentes espécies, em diferentes temperaturas estão descritos na Tabela 3. Para o leite de todas as espécies, houve diferença significativa ($P < 0,001$) no calor específico, que aumentou com o aumento da temperatura, tal como descrito na literatura (MINIM et al., 2002; HU et al.,

2009). O calor específico foi influenciado pela composição do leite, ou seja, houve diferenças significativas ($P < 0,001$) entre o leite de diferentes espécies em uma mesma temperatura. O leite de vaca e de cabra, em quase todas as temperaturas, apresentaram calor específico semelhante ($P \geq 0,05$), além disso, o calor específico foi maior do que o observado para as demais espécies. Isso pode estar relacionado com menor teor de sólidos presente no leite de vaca e de cabra (Tabela 2). Por outro lado, os menores valores de calor específico foram encontrados para o leite de ovelha, o qual apresentou em sua composição maiores teores de sólidos e de lipídeos (Tabela 2).

Tabela 3 – Calor específico (C_p , J.kg⁻¹.°C⁻¹) de leite de diferentes espécies, em diferentes temperaturas.

Temp. (°C)	Vaca	Búfala	Cabra	Ovelha	Valor P ¹
1	3862,9 ± 5,9 ^{a,I}	3674,1 ± 1,9 ^{b,J}	3859,1 ± 2,3 ^{a,H}	3602,1 ± 3,4 ^{c,I}	< 0,001
10	3870,7 ± 1,7 ^{a,HI}	3699,9 ± 2,5 ^{c,I}	3861,8 ± 1,4 ^{b,H}	3627,8 ± 3,4 ^{d,H}	< 0,001
20	3876,8 ± 2,1 ^{a,GH}	3720,3 ± 5,5 ^{c,H}	3867,3 ± 3,1 ^{bH}	3648,2 ± 7,2 ^{d,G}	< 0,001
30	3885,3 ± 11,2 ^{a,FG}	3740,2 ± 0,4 ^{b,G}	3879,9 ± 1,2 ^{a,G}	3671,4 ± 1,2 ^{c,F}	< 0,001
40	3889,3 ± 9,9 ^{a,F}	3759,8 ± 9,6 ^{b,F}	3888,7 ± 3,9 ^{a,F}	3669,1 ± 10,1 ^{c,F}	< 0,001
50	3906,2 ± 1,7 ^{a,E}	3779,3 ± 15,1 ^{b,E}	3902,1 ± 4,7 ^{a,E}	3716,7 ± 12,5 ^{c,E}	< 0,001
60	3922,2 ± 2,9 ^{a,D}	3797,4 ± 15,3 ^{b,D}	3917,5 ± 4,6 ^{a,D}	3737,5 ± 12,6 ^{c,D}	< 0,001
70	3949,9 ± 1,7 ^{a,C}	3824,4 ± 10,4 ^{b,C}	3935,3 ± 5,3 ^{a,C}	3762,7 ± 12,6 ^{c,C}	< 0,001
80	3970,9 ± 1,6 ^{a,B}	3844,9 ± 4,1 ^{c,B}	3955,4 ± 5,9 ^{b,B}	3783,6 ± 14,2 ^{d,B}	< 0,001
90	3994,4 ± 1,5 ^{a,A}	3864,6 ± 1,7 ^{c,A}	3984,5 ± 4,4 ^{b,A}	3804,5 ± 6,1 ^{d,A}	< 0,001
Valor P ²	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha e letras maiúsculas diferentes na mesma coluna, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$).

O efeito da temperatura e dos conteúdos de água e lipídeos nas propriedades termofísicas do leite de vaca foram estudados por Minim et al. (2002), os quais relataram que leite com maiores conteúdos de água apresentaram maiores valores de calor específico, enquanto leite com maiores conteúdos de lipídeos apresentaram menores valores de calor específico.

O teor de proteína do leite de vaca, búfala e cabra são semelhantes e o leite de ovelha apresenta maior teor proteico. Apesar desta diferença, provavelmente o teor de proteína não teve influência no valor de calor específico obtido e não foi encontrada na literatura uma relação entre calor específico e teor de proteínas.

Quatro modelos polinomiais empíricos foram ajustados aos dados experimentais obtidos (Tabela 4), de modo a determinar uma equação que descrevesse o calor específico em função da temperatura para o leite das diferentes espécies.

O modelo que melhor representa o calor específico do leite de vaca em função da temperatura, é o modelo polinomial de segunda ordem, enquanto o modelo linear melhor representou os dados experimentais de leite de búfala (Tabela 4).

Tabela 4 – Modelos polinomiais empíricos para calor específico de leite de diferentes espécies, em função da temperatura.

Constante	1º Grau	2º Grau	3º Grau	1º Grau	2º Grau	3º Grau
Vaca			Búfala			
ϕ_1	3847,43	3866,01	3864,84	3675,9	3675,73	3673,42
ϕ_2	1,45	0,09	0,28	2,1	2,11	2,49
ϕ_3		0,02	0,01		$1,4 \times 10^{-4}$	-0,01
ϕ_4			$4,1 \times 10^{-5}$			$8,1 \times 10^{-5}$
R_{Adj}^2	0,925	0,994	0,993	0,998	0,998	0,998
χ^2	153,94	12,46	13,74	7,3	8,32	6,62
Cabra			Ovelha			
ϕ_1	3843,24	3859,02	3857,47	3599,82	3603,15	3604,64
ϕ_2	1,37	0,22	0,48	2,27	2,03	1,78
ϕ_3	0	0,01	0,01	0	0	0,01
ϕ_4	0	0	$5,4 \times 10^{-5}$	0	0	$5,18 \times 10^{-5}$
R_{Adj}^2	0,941	0,998	0,998	0,986	0,988	0,982
χ^2	106,41	3,8	3,03	68,79	73,35	84,3

É válido ressaltar que o modelo de terceira ordem obteve os melhores parâmetros estatísticos, contudo uma das suas constantes apresentou valor tendendo a zero e anulando o termo cúbico da equação, desta forma, reduzindo ao polinômio de segunda ordem. Entretanto, este modelo não apresentou melhores parâmetros estatísticos quando comparado ao modelo de primeira ordem. Para o leite de cabra, o modelo polinomial de segunda ordem melhor representou os dados do calor específico em função da temperatura. Similar ao leite de búfala, o modelo cúbico do leite de cabra apresentou entre suas constantes valor tendendo a zero, reduzindo ao modelo de segunda ordem. Por fim, o modelo linear melhor representou o calor específico em diferentes temperaturas para o leite de ovelha.

Desta forma, as equações que melhor representam o calor específico do leite das diferentes espécies em função da temperatura, com os dados ajustados são:

Vaca: $C_{p(vaca)} = 3866,01 + 0,09T + 0,02T^2$ (19)

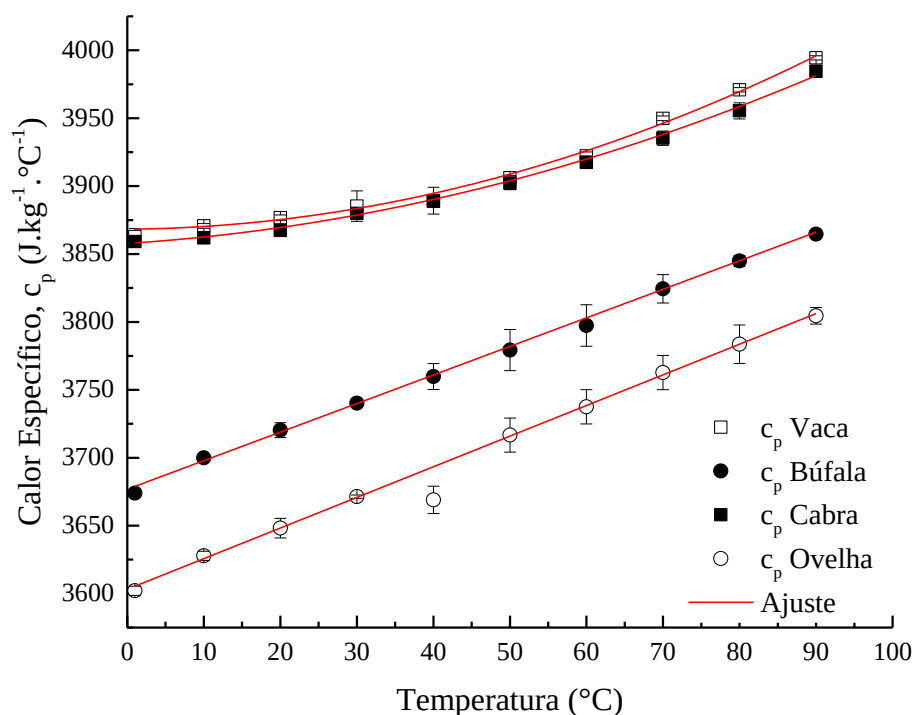
Búfala: $C_{p(búfala)} = 3675,9 + 2,1T$ (20)

Cabra: $C_{p(cabra)} = 3859,02 + 0,22T + 0,01T^2$ (21)

Ovelha: $C_{p(ovelha)} = 3599,82 + 2,27T$ (22)

Os valores experimentais de calor específico do leite de diferentes espécies e os obtidos pelos modelos polinomiais, em função da temperatura estão ilustrados na Figura 10.

Figura 10 – Calor específico do leite de diferentes espécies, em função da temperatura. Os pontos representam o valor médio dos dados obtidos experimentalmente, enquanto as linhas contínuas representam o melhor modelo matemático.



Após a escolha do melhor modelo matemático para descrever o calor específico e função da temperatura para as amostras de leite de diferentes espécies, foi avaliado o erro médio relativo (EMR) entre os valores obtidos pelo modelo matemático

selecionado e os valores determinados pelas equações propostas por Choi e Okos (1986) (Equações 1 a 7). Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Comparação entre o modelo matemático e equações de Choi e Okos (1986) para o calor específico em leite de vaca e búfala. EMR: erro médio relativo.

Temp. (°C)	Vaca			Búfala		
	Modelo	Choi & Okos	EMR	Modelo	Choi & Okos	EMR
1	3866,12	3893,85	0,72%	3678,00	3817,97	3,81%
10	3868,91	3895,27	0,68%	3696,90	3819,83	3,33%
20	3875,81	3897,67	0,56%	3717,90	3822,67	2,82%
30	3886,71	3900,93	0,37%	3738,90	3826,29	2,34%
40	3901,61	3905,06	0,09%	3759,90	3830,71	1,88%
50	3920,51	3910,06	0,27%	3780,90	3835,93	1,46%
60	3943,41	3915,92	0,70%	3801,90	3841,94	1,05%
70	3970,31	3922,65	1,20%	3822,90	3848,75	0,68%
80	4001,21	3930,25	1,77%	3843,90	3856,35	0,32%
90	4036,11	3938,71	2,41%	3864,90	3864,75	0,00%

Tabela 6 – Comparação entre o modelo matemático e equações de Choi e Okos (1986) para o calor específico em leite de cabra e ovelha. EMR: erro médio relativo.

Temp. (°C)	Cabra			Ovelha		
	Modelo	Choi & Okos	EMR	Modelo	Choi & Okos	EMR
1	3859,25	3903,37	1,14%	3602,09	3758,59	4,34%
10	3862,22	3904,72	1,10%	3622,52	3760,76	3,82%
20	3867,42	3907,06	1,03%	3645,22	3763,88	3,26%
30	3874,62	3910,28	0,92%	3667,92	3767,77	2,72%
40	3883,82	3914,37	0,79%	3690,62	3772,41	2,22%
50	3895,02	3919,33	0,62%	3713,32	3777,80	1,74%
60	3908,22	3925,17	0,43%	3736,02	3783,96	1,28%
70	3923,42	3931,89	0,22%	3758,72	3790,87	0,86%
80	3940,62	3939,48	0,03%	3781,42	3798,54	0,45%
90	3959,82	3947,94	0,30%	3804,12	3806,96	0,07%

Observou-se baixos valores de EMR entre os valores obtidos pelo modelo matemático selecionado e valores determinados pelas equações de Choi e Okos (1986) (Tabelas 5 e 6), indicando que o modelo representa satisfatoriamente os dados de calor específico para leite de diferentes espécies, em uma ampla faixa de temperatura. Estes dados são necessários para os cálculos que envolvam processos

térmicos de leite de diferentes espécies, bem como, determinação do campo acústico em processos que envolvam aplicação de US.

5.3. Parâmetros reológicos e modelagem matemática

Os resultados da viscosidade do leite de vaca, búfala, cabra e ovelha, ajustados pela Lei de Newton, em diferentes temperaturas estão descritos na Tabela 7. Os dados reológicos e a comparação entre os modelos Ostwald-De Waele, Herschel-Bulkley e Bingham, estão apresentados nas Tabela 8, 9, 10 e 11, para leite das diferentes espécies, respectivamente.

Tabela 7 – Viscosidade média (μ , mPa.s) de leite de diferentes espécies, em diferentes temperaturas ($^{\circ}\text{C}$).

Temp.	Vaca	Búfala	Cabra	Ovelha	Valor P ¹
1	3,525 $\pm$ 0,023 ^{d,A}	4,151 $\pm$ 0,017 ^{b,A}	3,683 $\pm$ 0,045 ^{c,A}	4,285 $\pm$ 0,028 ^{a,A}	< 0,001
10	2,677 $\pm$ 0,027 ^{d,B}	3,217 $\pm$ 0,021 ^{b,B}	2,981 $\pm$ 0,042 ^{c,B}	3,582 $\pm$ 0,037 ^{a,B}	< 0,001
20	2,215 $\pm$ 0,005 ^{c,C}	2,476 $\pm$ 0,014 ^{b,C}	2,066 $\pm$ 0,024 ^{d,C}	2,546 $\pm$ 0,015 ^{a,C}	< 0,001
30	1,723 $\pm$ 0,010 ^{c,D}	1,961 $\pm$ 0,020 ^{b,D}	1,639 $\pm$ 0,007 ^{d,D}	2,075 $\pm$ 0,023 ^{a,D}	< 0,001
40	1,284 $\pm$ 0,004 ^{c,E}	1,672 $\pm$ 0,014 ^{a,E}	1,282 $\pm$ 0,004 ^{c,E}	1,625 $\pm$ 0,007 ^{b,E}	< 0,001
50	1,108 $\pm$ 0,017 ^{b,F}	1,419 $\pm$ 0,014 ^{a,F}	1,102 $\pm$ 0,004 ^{b,F}	1,411 $\pm$ 0,002 ^{a,F}	< 0,001
60	0,853 $\pm$ 0,001 ^{c,G}	1,160 $\pm$ 0,009 ^{a,G}	0,847 $\pm$ 0,009 ^{c,G}	1,106 $\pm$ 0,004 ^{b,G}	< 0,001
70	0,737 $\pm$ 0,005 ^{c,H}	0,900 $\pm$ 0,007 ^{b,H}	0,702 $\pm$ 0,001 ^{d,H}	0,972 $\pm$ 0,001 ^{a,H}	< 0,001
80	0,593 $\pm$ 0,002 ^{c,I}	0,769 $\pm$ 0,002 ^{a,I}	0,580 $\pm$ 0,005 ^{d,I}	0,753 $\pm$ 0,004 ^{b,I}	< 0,001
90	0,519 $\pm$ 0,002 ^{c,J}	0,679 $\pm$ 0,003 ^{a,J}	0,506 $\pm$ 0,004 ^{d,J}	0,642 $\pm$ 0,002 ^{b,J}	< 0,001
Valor P ²	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha e letras maiúsculas diferentes na mesma coluna, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Analisando os dados ajustados pelo modelo de Ostwald-De Waele para o leite das quatro espécies e em todas as temperaturas, observa-se que o valor de n é muito próximo de 1, ou seja, ela passa a ser igual ao modelo de Newton. Para o modelo Herschel-Bulkley, tanto para leite de vaca e búfala, quanto para cabra e ovelha, em todas as temperaturas, o valor de σ_0 é muito próximo de zero e de n aproximadamente 1 (variando entre valores maiores e menores que 1, um indicativo de fluido pseudoplástico e dilatante na mesma amostra, mais um indício de que as variações são originadas de erros experimentais, devendo se adotar $n = 1$), com isso, a equação se torna igual o modelo de Newton. Realizando o ajuste pelo modelo de Bingham, o

valor de σ_0 é praticamente zero em todas as temperaturas para o leite das quatro espécies, o que torna a equação idêntica ao modelo de Newton.

Tabela 8 – Comparação dos modelos reológicos para leite de vaca.

Temp. (°C)	Ostwald-De Waele		Herchel Bulkley			Bingham	
	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s ⁿ)
1	0,00347	1,00359	0,00000	0,00347	1,00359	0,00000	0,00353
10	0,00267	1,00084	0,00003	0,00266	1,00109	0,00000	0,00268
20	0,00224	0,99803	0,00000	0,00224	0,99808	0,00006	0,00221
30	0,00160	1,01626	0,00058	0,00154	1,02331	0,00000	0,00172
40	0,00132	0,99473	0,00000	0,00132	0,99476	0,00006	0,00128
50	0,00107	1,00645	0,00008	0,00107	1,00798	0,00000	0,00111
60	0,00076	1,02322	0,00041	0,00072	1,03336	0,00000	0,00085
70	0,00071	1,00836	0,00011	0,00070	1,01154	0,00000	0,00074
80	0,00062	0,99125	0,00000	0,00062	0,99127	0,00006	0,00059
90	0,00049	1,01254	0,00014	0,00048	1,01800	0,00000	0,00052

Tabela 9 – Comparação dos modelos reológicos para leite de búfala.

Temp. (°C)	Ostwald-De Waele		Herchel Bulkley			Bingham	
	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s ⁿ)
1	0,00416	0,99966	0,00003	0,00415	0,99987	0,00000	0,00415
10	0,00310	1,00763	0,00003	0,00310	1,00784	0,00000	0,00322
20	0,00248	0,99976	0,00000	0,00248	0,99974	0,00000	0,00248
30	0,00187	1,01064	0,00047	0,00182	1,01567	0,00000	0,00196
40	0,00164	1,00376	0,00016	0,00163	1,00572	0,00000	0,00167
50	0,00130	1,01880	0,00008	0,00129	1,02003	0,00000	0,00142
60	0,00113	1,00548	0,00008	0,00112	1,00691	0,00000	0,00116
70	0,00092	0,99492	0,00000	0,00092	0,99493	0,00004	0,00090
80	0,00076	1,00316	0,00003	0,00076	1,00382	0,00000	0,00077
90	0,00067	1,00133	0,00000	0,00067	1,00132	0,00000	0,00068

Tabela 10 – Comparação dos modelos reológicos para leite de cabra.

Temp. (°C)	Ostwald-De Waele		Herchel Bulkley			Bingham	
	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s ⁿ)
1	0,00348	1,01225	0,00003	0,00347	1,01243	0,00000	0,00368
10	0,00287	1,00838	0,00003	0,00286	1,00860	0,00000	0,00298
20	0,00196	1,01116	0,00039	0,00192	1,01508	0,00000	0,00207
30	0,00175	0,98624	0,00000	0,00175	0,98623	0,00029	0,00164
40	0,00121	1,01275	0,00016	0,00119	1,01534	0,00000	0,00128
50	0,00099	1,02319	0,00056	0,00093	1,03388	0,00000	0,00110
60	0,00078	1,01709	0,00026	0,00076	1,02356	0,00000	0,00085
70	0,00066	1,01455	0,00020	0,00063	1,02051	0,00000	0,00070
80	0,00056	1,00696	0,00003	0,00056	1,00791	0,00000	0,00058
90	0,00049	1,00509	0,00003	0,00049	1,00631	0,00000	0,00051

Tabela 11 – Comparação dos modelos reológicos para leite de ovelha.

Temp. (°C)	Ostwald-De Waele		Herchel Bulkley			Bingham	
	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	κ (Pa.s)	n	σ_0 (Pa)	μ_{pl} (Pa.s ⁿ)
1	0,00430	0,99913	0,00000	0,00430	0,99912	0,00000	0,00428
10	0,00341	1,01068	0,00003	0,00340	1,01087	0,00000	0,00358
20	0,00252	1,00237	0,00009	0,00251	1,00317	0,00000	0,00255
30	0,00195	1,01307	0,00059	0,00189	1,01899	0,00000	0,00207
40	0,00160	1,00313	0,00002	0,00160	1,00332	0,00000	0,00163
50	0,00137	1,00578	0,00010	0,00136	1,00713	0,00000	0,00141
60	0,00107	1,00680	0,00015	0,00106	1,00950	0,00000	0,00111
70	0,00094	1,00629	0,00012	0,00093	1,00874	0,00000	0,00097
80	0,00071	1,01186	0,00018	0,00069	1,01688	0,00000	0,00075
90	0,00063	1,00406	0,00005	0,00063	1,00551	0,00000	0,00064

O teste de consistência para a Lei de Newton é apresentado na Tabela 12, em que o leite de vaca, búfala, cabra e ovelha, apresentaram para todas as temperaturas, valores de R^2 praticamente 1, P bem abaixo de 10%, variando de 1,2 a 2,7 e por fim, valores de RQME próximos a zero, demonstrando um bom ajuste deste modelo aos dados experimentais.

Tabela 12 – Parâmetros estatísticos da Lei de Newton.

Temp. (°C)	R ²	P (%)	RQME	R ²	P (%)	RQME
Vaca				Búfala		
1	0,9991	2,4886	0,0312	0,9994	2,0311	0,0241
10	0,9990	2,2524	0,0267	0,9993	1,9105	0,0238
20	0,9992	2,2168	0,0261	0,9990	2,1176	0,0260
30	0,9988	1,9501	0,0248	0,9983	2,0954	0,0272
40	0,9994	1,9382	0,0242	0,9984	2,1828	0,0273
50	0,9989	2,1448	0,0275	0,9979	2,2651	0,0280
60	0,9984	2,3012	0,0283	0,9990	2,0307	0,0248
70	0,9988	1,7628	0,0238	0,9994	2,0174	0,0245
80	0,9994	1,9716	0,0240	0,9994	1,9282	0,0236
90	0,9988	1,7330	0,0233	0,9996	1,7865	0,0233
Cabra				Ovelha		
1	0,9982	2,6817	0,0331	0,9995	1,9478	0,0237
10	0,9990	2,1515	0,0271	0,9989	2,1461	0,0259
20	0,9991	1,8879	0,0241	0,9994	1,9242	0,0234
30	0,9993	2,0260	0,0244	0,9987	2,1624	0,0282
40	0,9984	2,6509	0,0333	0,9992	1,9895	0,0256
50	0,9979	2,4006	0,0330	0,9996	1,5333	0,0192
60	0,9985	2,3962	0,0331	0,9995	1,3402	0,0173
70	0,9986	2,0573	0,0271	0,9996	1,4284	0,0187
80	0,9991	2,1643	0,0258	0,9995	1,6141	0,0200
90	0,9987	2,0305	0,0265	0,9995	1,2407	0,0160

Para a determinação da relação entre a viscosidade e a temperatura, utilizando os dados ajustados à Lei de Newton, foram utilizadas 3 equações para se obter o melhor ajuste aos dados experimentais (Equações 16, 17 e 18), utilizando os parâmetros estatísticos para escolha da melhor equação (Tabela 13).

Os parâmetros estatísticos (Tabela 13) mostram que a equação de Arrhenius melhor se ajusta aos dados de viscosidade em função da temperatura para o leite de vaca, búfala, cabra e ovelha. O valor de R^2 é o mais próximo de 1, e os valores de P e de RQME são os menores, nos permitindo afirmar ser esta a melhor equação.

Tabela 13 – Parâmetros estatísticos das equações que relacionam a Viscosidade e a Temperatura, com os dados obtidos pela Lei de Newton.

Equação	Estatística	Vaca	Búfala	Cabra	Ovelha
Arrhenius	R ²	0,99759	0,99803	0,99667	0,99614
	P (%)	2,56319	2,63842	2,50167	2,82669
	RQME	0,02758	0,03012	0,02950	0,03235
2º grau	R ²	0,99215	0,98638	0,98334	0,98672
	P (%)	10,19644	8,08629	11,39021	5,98059
	RQME	0,12862	0,10530	0,13843	0,07632
Exponencial	R ²	0,99368	0,98821	0,99197	0,99274
	P (%)	4,14697	4,47816	8,18398	6,30154
	RQME	0,05490	0,05302	0,10430	0,07608

Desta forma, as equações que melhor representam a viscosidade do leite das diferentes espécies em função da temperatura, com os dados ajustados à Lei de Newton são:

$$\textbf{Vaca:} \quad \mu_{(vaca)} = 1,33 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\left(\frac{-17990}{8,3145 \cdot T}\right)} \quad (23)$$

$$\textbf{Búfala:} \quad \mu_{(búfala)} = 2,64 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\left(\frac{-16749}{8,3145 \cdot T}\right)} \quad (24)$$

$$\textbf{Cabra:} \quad \mu_{(cabra)} = 1,01 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\left(\frac{-18685}{8,3145 \cdot T}\right)} \quad (25)$$

$$\textbf{Ovelha:} \quad \mu_{(ovelha)} = 1,91 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\left(\frac{-17628}{8,3145 \cdot T}\right)} \quad (26)$$

Os valores experimentais da viscosidade e os obtidos pela equação de Arrhenius ajustada para o leite das diferentes espécies, em função da temperatura estão ilustrados nas Figuras 11, 12, 13 e 14 e mostram muito bom ajuste dos dados pela equação.

Figura 11 – Viscosidade do leite de vaca em função da temperatura, sendo os quadrados vazios os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.

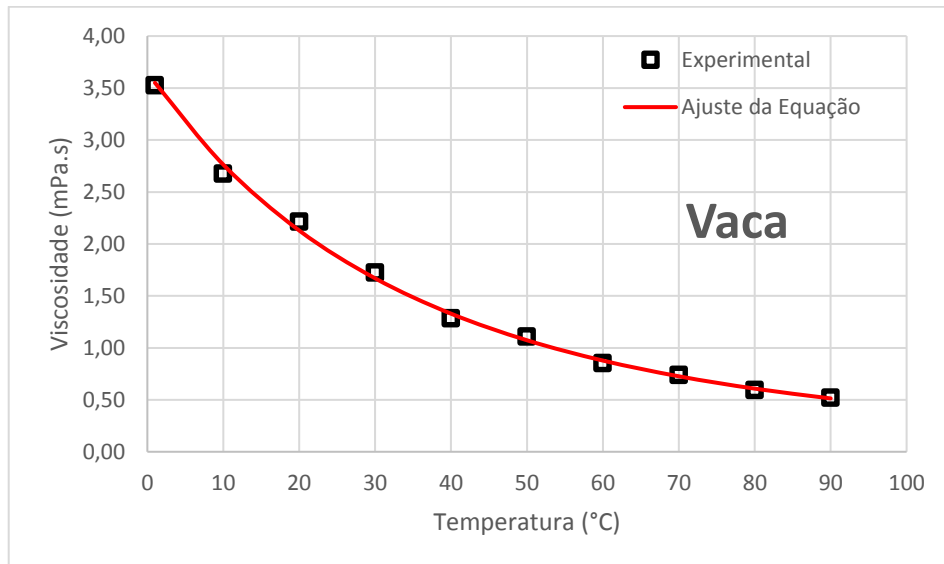


Figura 12 – Viscosidade do leite de búfala em função da temperatura, sendo círculos sólidos os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.

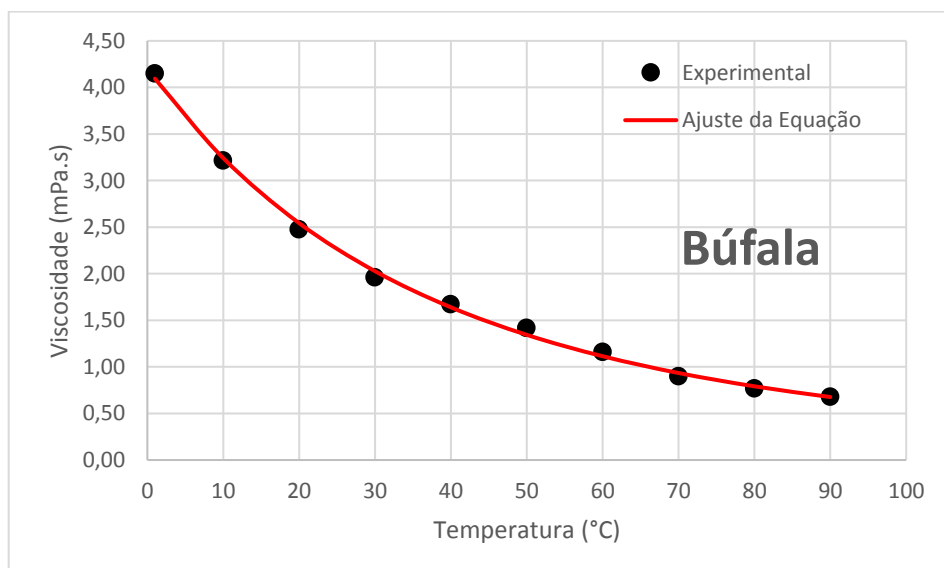


Figura 13 – Viscosidade do leite de cabra em função da temperatura, sendo quadrados sólidos os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.

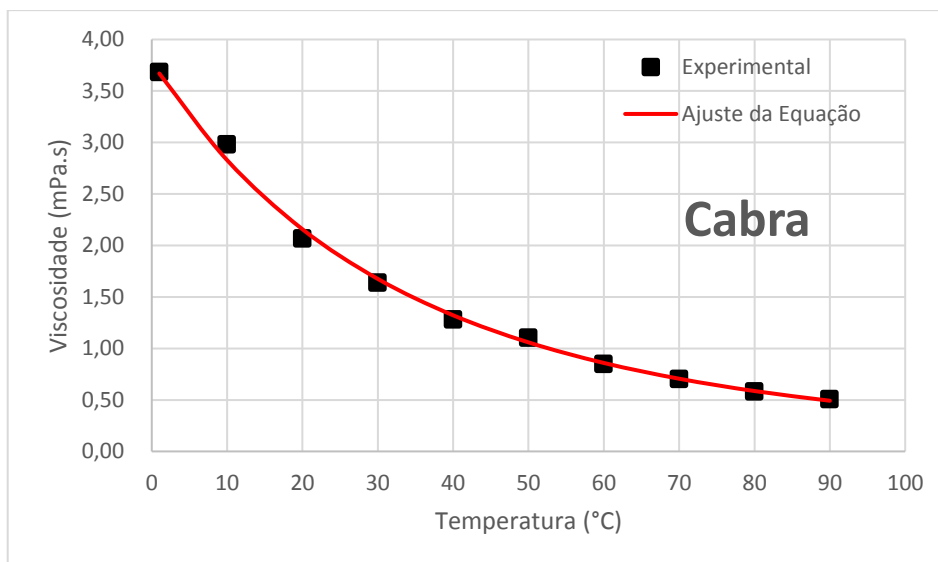
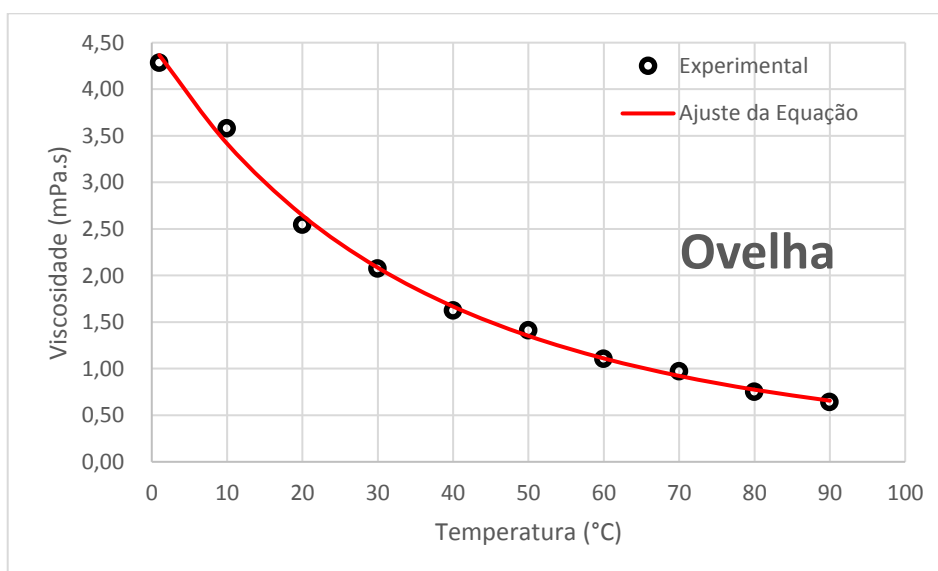


Figura 14 – Viscosidade do leite de ovelha em função da temperatura, sendo os círculos vazios os valores experimentais e a linha vermelha os valores obtidos pela equação ajustada.



5.4. Campo acústico e modelagem matemática

Para cada espécie de leite, o experimento foi realizado em triplicata. Com a aplicação do US, houve um aumento de temperatura em função do tempo. Por meio de uma regressão linear de 1º grau, os dados das Tabelas 14 e 15 foram obtidos,

onde o coeficiente de inclinação da reta é a derivada da temperatura em função do tempo (dT/dt).

Tabela 14 – Leite de Vaca, derivada da temperatura em função do tempo (dT/dt) para cada potência de ultrassom aplicada.

Posição	Taxa de Aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$)			SEM	Valor P^1
	300 W	500 W	700 W		
S1	$0,0147 \pm 0,0014^c$	$0,0189 \pm 0,0006^b$	$0,0232 \pm 0,0011^a$	0,0011	$< 0,01$
S2	$0,0144 \pm 0,0014^c$	$0,0188 \pm 0,0008^b$	$0,0234 \pm 0,0011^a$	0,0011	$< 0,01$
S3	$0,0145 \pm 0,0014^c$	$0,0190 \pm 0,0008^b$	$0,0235 \pm 0,0011^a$	0,0011	$< 0,01$
S4	$0,0145 \pm 0,0013^c$	$0,0189 \pm 0,0008^b$	$0,0236 \pm 0,0012^a$	0,0012	$< 0,01$
Média	$0,0145 \pm 0,0013$	$0,0189 \pm 0,0007$	$0,0234 \pm 0,0010$		
SEM	0,0003	0,0002	0,0003		
Valor P^2	n.s.	n.s.	n.s.		

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$); SEM: erro padrão da média (*standard error of the mean*); n.s.: diferença não significativa ($P \geq 0,05$).

Tabela 15 – Leite de Cabra, derivada da temperatura em função do tempo (dT/dt) para cada potência de ultrassom aplicada.

Posição	Taxa de Aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$)			SEM	Valor P^1
	300 W	500 W	700 W		
S1	$0,0152 \pm 0,0009^c$	$0,0201 \pm 0,0006^b$	$0,0248 \pm 0,0005^a$	0,0014	$< 0,01$
S2	$0,0149 \pm 0,0003^c$	$0,0197 \pm 0,0001^b$	$0,0243 \pm 0,0003^a$	0,0014	$< 0,01$
S3	$0,0143 \pm 0,0000^c$	$0,0195 \pm 0,0003^b$	$0,0242 \pm 0,0003^a$	0,0014	$< 0,01$
S4	$0,0140 \pm 0,0004^c$	$0,0194 \pm 0,0004^b$	$0,0242 \pm 0,0004^a$	0,0015	$< 0,01$
Média	$0,0146 \pm 0,0007$	$0,0197 \pm 0,0004$	$0,0243 \pm 0,0004$		
SEM	0,0002	0,0001	0,0001		
Valor P^2	n.s.	n.s.	n.s.		

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$); SEM: erro padrão da média (*standard error of the mean*); n.s.: diferença não significativa ($P \geq 0,05$).

Conforme constatado nas Tabelas 14 e 15, não há diferença significativa entre as 4 posições de coleta da temperatura ($P^2 \geq 0,05$), indicando que o valor de dT/dt independe da posição que se encontra o sensor, desta forma o valor médio dos 4 sensores, para cada potência e cada espécie de leite, foi utilizado para cálculo da potência acústica. Entretanto, considerando potências nominais diferentes aplicadas

para a mesma posição do sensor, houve diferença significativa entre os valores ($P^1 < 0,05$).

A partir dos valores médios da massa, dos valores de calor específico (Equações 20 e 22), da temperatura do leite no momento do experimento e os valores médios de dT/dt (Tabelas 14 e 15), os dados de campo acústico e de eficiência de aplicação da potência da sonda foram calculados utilizando a Equação 8 (Tabela 16).

Tabela 16 – Potência acústica e eficiência em função da potência nominal aplicada pela sonda, para cada espécie de leite.

Potência	Vaca		Cabra		Valor P^1
Nominal	P _{acústica} (W)	Eficiência	P _{acústica} (W)	Eficiência	
300 W	54,56 ± 4,01 ^{a,C}	18,2%	56,64 ± 0,15 ^{a,C}	18,9%	n.s.
500 W	71,21 ± 1,67 ^{b,B}	14,2%	76,76 ± 0,88 ^{a,B}	15,4%	< 0,01
700 W	88,34 ± 3,15 ^{b,A}	12,6%	94,87 ± 0,80 ^{a,A}	13,6%	0,03
SEM	4,31		5,52		
Valor P^2	< 0,01		< 0,01		

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha, indicam diferença significativa de acordo com o T-test ($\alpha = 0,05$). Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna, indicam diferença significativa de acordo a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$); SEM: erro padrão da média (*standard error of the mean*); n.s.: diferença não significativa ($P \geq 0,05$).

Para o primeiro nível de potência nominal aplicada (300 W) não houve diferença significativa entre as espécies ($P \geq 0,05$) e a eficiência obteve o melhor valor, sendo ligeiramente maior para o leite de cabra. Para o segundo (500 W) e terceiro (700 W) nível de potência nominal aplicada, em ambos houve diferença significativa entre as espécies ($P < 0,05$), onde o provável efeito dessa diferença deva ser em função do tamanho menor dos glóbulos de gordura no leite de cabra, proporcionando uma melhor eficiência de aplicação, quando comparado com o leite de vaca.

Para as diferentes potências nominais de aplicação em ambas espécies, houve diferença significativa entre as potências acústicas ($P < 0,05$), aumentando à medida que se aumenta a potência nominal, porém a eficiência do aproveitamento da potência nominal disponível na sonda, reduz à medida que se aumenta a potência nominal na sonda.

5.5. Aplicação de US em leite

Após aplicação de US, utilizando as mesmas condições utilizadas para obtenção do valor de campo acústico, com aplicação de diferentes valores potência por 14 min, foram determinados os teores de lipídeos (Tabela 17), de proteínas (Tabela 18) e acidez titulável (Tabela 19), assim como os dados para leite sem tratamento e leite pasteurizado, para ambas as espécies.

Tabela 17 – Teor de lipídeos (%) do leite no dia dos tratamentos (D+0) e sete dias após os tratamentos (D+7).

Tratamento	Vaca		Cabra		Valor P ¹
	D+0	D+7	D+0	D+7	
Sem					
Tratamento	3,17 ± 0,30 ^a	3,32 ± 0,35 ^a	2,73 ± 0,06 ^b	2,70 ± 0,04 ^b	< 0,01
US 300 W	3,29 ± 0,36 ^a	3,38 ± 0,39 ^a	2,72 ± 0,11 ^b	2,74 ± 0,05 ^b	< 0,01
US 500 W	3,07 ± 0,11 ^a	3,14 ± 0,09 ^a	2,76 ± 0,07 ^b	2,73 ± 0,24 ^b	< 0,01
US 700 W	3,09 ± 0,33 ^{a,b}	3,29 ± 0,32 ^a	2,78 ± 0,05 ^{b,c}	2,69 ± 0,35 ^c	< 0,01
Pasteurizado	3,09 ± 0,06 ^a	3,15 ± 0,04 ^a	2,78 ± 0,05 ^b	2,75 ± 0,06 ^b	< 0,01
Média	3,15 ± 0,28	3,28 ± 0,31	2,75 ± 0,07	2,72 ± 0,19	
SEM	0,05	0,05	0,01	0,02	
Valor P ²	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$); SEM: erro padrão da média (*standard error of the mean*); n.s.: diferença não significativa ($P \geq 0,05$).

Não houve diferença significativa ($P \geq 0,05$) no teor de lipídeos para as 2 espécies de leite, entre as amostras obtidas imediatamente após o tratamento de US e após 7 dias sob refrigeração a 4 °C (Tabela 17). Entretanto, houve diferença significativa ($P < 0,05$) entre as amostras de leite de vaca e de cabra. O aumento da potência da aplicação de US não resultou em alteração no teor de lipídeos. Em todas as amostras, não se observou separação de fases, ou seja, gordura na superfície, inclusive após 7 dias de estocagem sob refrigeração, o que demonstra o efeito de homogeneização promovido pela sonicação.

Em geral, não houve diferença significativa ($P \geq 0,05$) no teor de proteínas para as 2 espécies de leite, entre as amostras obtidas imediatamente após o tratamento de US e após 7 dias sob refrigeração a 4 °C (Tabela 18). Apesar de pequenas diferenças observadas durante a estocagem refrigerada, não é possível concluir que a aplicação

do US foi o causador desta diferença de valores. O aumento da potência da aplicação de US não resultou em alteração no teor de proteínas.

Tabela 18 – Teor de proteínas (%) do leite no dia dos tratamentos (D+0) e sete dias após os tratamentos (D+7).

Tratamento	Vaca		Cabra		Valor P^1
	D+0	D+7	D+0	D+7	
Sem					
Tratamento					
US 300 W	3,11 ± 0,06 ^{a,b,A}	3,13 ± 0,05 ^{a,C}	3,03 ± 0,03 ^{c,A}	3,07 ± 0,01 ^{b,c,B}	< 0,01
US 500 W	3,13 ± 0,07 ^{a,A}	3,17 ± 0,06 ^{a,C}	3,05 ± 0,03 ^{b,A}	3,14 ± 0,01 ^{a,A}	< 0,01
US 700 W	3,14 ± 0,06 ^{b,A}	3,24 ± 0,08 ^{a,A,B}	3,04 ± 0,03 ^{c,A}	3,15 ± 0,01 ^{b,A}	< 0,01
Pasteurizado	3,12 ± 0,05 ^{b,A}	3,28 ± 0,04 ^{a,A}	3,03 ± 0,04 ^{c,A}	3,14 ± 0,02 ^{b,A}	< 0,01
Média	3,14 ± 0,00 ^{a,A}	3,16 ± 0,00 ^{a,B,C}	3,06 ± 0,03 ^{b,A}	3,08 ± 0,03 ^{b,B}	< 0,01
SEM	0,01	0,01	0,00	0,01	
Valor P^2	n.s.	< 0,01	n.s.	< 0,01	

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha e letras maiúsculas diferentes na mesma coluna, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$); SEM: erro padrão da média (*standard error of the mean*); n.s.: diferença não significativa ($P \geq 0,05$).

Após a aplicação de US nas amostras de leite de vaca e cabra, ocorreu aumento da acidez (Tabela 19), intensificando à medida que se aumentou a potência nominal. As amostras de ambas as espécies estocadas por 7 dias sob refrigeração a 4 °C, apresentaram aumento da acidez titulável durante a estocagem, sendo mais elevada a acidez quanto maior a potência nominal de US aplicada na amostra. Em todos os tratamentos de aplicação de US, em ambas as espécies, a acidez titulável foi superior a 18 °D, estando em desacordo para um consumo seguro, estabelecidos na Instrução Normativa 76/2018 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2018).

Entre as espécies, houve diferença significativa na acidez titulável das amostras com a aplicação de US, cujo aumento foi mais expressivo para o leite de vaca à medida que se aumentou a potência nominal, provavelmente este aumento pode estar relacionado à diferença na composição do leite destas espécies. Estudos adicionais são necessários para esclarecer estas observações.

Estudos disponíveis na literatura relatam aumento da acidez com a aplicação de US. Em um estudo, o leite foi submetido a US de 160 W e frequência de 20, 40 e 60 kHz por 20 min e utilizado para a produção de queijo branco ultrafiltrado. Os autores

observaram aumento da acidez titulável após a estocagem, quando comparada com a amostra sem tratamento de US (JALILZADEH et al., 2018). O aumento da acidez devido ao US pode ser atribuído à hidrólise dos triglicerídeos e consequente aumento de ácidos graxos livres (ULUKO et al., 2015).

Em outro estudo, a aplicação de US por 15, 30 e 45 segundos a cada 2 horas, com potências de 40, 80 120 W, durante a fermentação de leite resultou em aumento da produção de ácido láctico, juntamente com aumento da reprodução celular e consumo de substrato (DAHROUD et al., 2016). No experimento de Barukčić et al. (2015), o soro de leite e culturas lácticas selecionadas foram sonicadas com 84 e 102 W por 75 e 150 segundos, antes da inoculação. Observou-se redução do tempo de fermentação, contagem de células viáveis aumentada e melhoria das propriedades sensoriais (BARUKČIĆ et al., 2015).

Na produção de derivados lácteos, a fermentação é a etapa que consome mais tempo e recurso. O US pode aumentar a taxa de fermentação de bactérias lácticas, modificando seu metabolismo enquanto melhora os características de qualidade, como capacidade de retenção de água, perfil de textura e sinérese do leite fermentado (ABESINGHE et al., 2019).

Wu, Hulbert e Mount (2000), para a fabricação de iogurte sonicaram o leite adicionado das culturas lácticas antes da fermentação, com potências de 450, 225 e 90 W a 20 kHz, por 1, 6 e 10 min. e observaram um rápido desenvolvimento ácido, aumento da capacidade de retenção de água, e redução no tempo de fermentação e na sinérese.

As amostras de leite sem tratamento e de leite pasteurizado no dia das análises (D+0) apresentaram de acidez titulável abaixo de 18 °D; após 7 dias de estocagem refrigerada (D+7), o leite sem tratamento apresentou acidez acima de 18 °D, para ambas as espécies e em desacordo com a Instrução Normativa 76/2018 (BRASIL, 2018). As amostras de leite pasteurizado após 7 dias de estocagem refrigerada (D+7), para ambas as espécies, apresentaram acidez abaixo de 18 °D, atendendo os requisitos da legislação brasileira e aptas para consumo humano.

Tabela 19 – Acidez titulável (°D) do leite no dia dos tratamentos (D+0) e sete dias após os tratamentos (D+7).

Tratamento	Vaca		Cabra		Valor p ¹
	D+0	D+7	D+0	D+7	
Sem					
Tratamento	17,45 ± 0,70 ^{b,B}	19,91 ± 1,42 ^{a,B}	16,85 ± 0,50 ^{b,B}	20,90 ± 1,03 ^{a,B}	< 0,01
US 300 W	20,45 ± 1,91 ^{b,A,B}	21,63 ± 1,78 ^{a,b,B}	19,51 ± 0,72 ^{b,A}	24,22 ± 1,15 ^{a,A}	0,017
US 500 W	22,89 ± 2,43 ^{b,c,A}	27,59 ± 1,84 ^{a,A}	19,84 ± 0,50 ^{c,A}	24,88 ± 1,00 ^{a,b,A}	< 0,01
US 700 W	23,44 ± 2,99 ^{b,c,A}	29,14 ± 2,89 ^{a,A}	20,11 ± 1,03 ^{c,A}	26,28 ± 0,87 ^{a,b,A}	< 0,01
Pasteurizado	17,57 ± 0,13 ^{a,B}	17,64 ± 0,24 ^{a,B}	16,39 ± 0,41 ^{a,B}	17,58 ± 0,94 ^{a,C}	n.s.
Média	20,68 ± 3,13	23,58 ± 4,67	18,54 ± 1,74	22,77 ± 3,36	
SEM	0,74	0,95	0,45	0,87	
Valor P²	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	

^{1,2} Letras minúsculas diferentes na mesma linha e letras maiúsculas diferentes na mesma coluna, indicam diferença significativa de acordo com a Análise de Variância (ANOVA) ($P < 0,05$) e teste de comparação múltipla de Tukey ($\alpha = 0,05$); SEM: erro padrão da média (*standard error of the mean*); n.s.: diferença não significativa ($P \geq 0,05$).

6. CONCLUSÕES

O calor específico do leite foi influenciado significativamente pela temperatura e pela composição das diferentes espécies de leite. Houve aumento do calor específico com o aumento da temperatura. O calor específico foi maior para leite com baixos teores de sólidos e de lipídeos. Na modelagem matemática, os modelos de primeira e de segunda ordem melhor se ajustaram aos dados experimentais, sendo o modelo linear para o leite de búfala e de ovelha, e o modelo parabólico para o leite de vaca e de cabra. Tanto a equação preditiva, quanto as equações de Choi e Okos (1986) foram adequadas para estimar o calor específico do leite de diferentes espécies.

A viscosidade do leite das quatro espécies (vaca, búfala, cabra e ovelha), modelados matematicamente, apresentou comportamento newtoniano na faixa de temperatura estudada. A viscosidade do leite variou com a temperatura, sendo decrescente e constante com o aumento da temperatura; a equação de Arrhenius foi a que melhor descreveu esta relação.

Nas condições experimentais, o campo acústico não foi influenciado pela posição da sonda de aplicação de US. À medida que se aumentou a potência nominal do US, a eficiência no campo acústico diminuiu. O leite de cabra apresentou melhor eficiência de aplicação da potência nominal, comparado ao leite de vaca.

Com a aplicação de US no leite nas condições experimentais, não houve um efeito de conservação esperado, uma vez que houve aumento indesejável da acidez titulável após aplicação de US e intensificado após 7 dias de estocagem sob refrigeração. Quanto maior a potência nominal do US, maior o teor de acidez, resultando valores em desacordo com os requisitos para consumo humano de leite.

REFERÊNCIAS

- AADIL, R. M.; ZENG, X.-A.; HAN, Z.; SUN, D.-W. Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 141, n. 3, p. 3201–3206, 2013.
- ABESINGHE, A. M. N. L.; ISLAM, N.; VIDANARACHCHI, J. K.; PRAKASH, S.; SILVA, K. F. S. T.; KARIM, M. A. Effects of ultrasound on the fermentation profile of fermented milk products incorporated with lactic acid bacteria. **International Dairy Journal**, [s. l.], v. 90, p. 1–14, 2019.
- ABU-JDAYIL, B.; MOHAMEED, H. Experimental and modelling studies of the flow properties of concentrated yogurt as affected by the storage time. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 359–365, 2002.
- ALATALO, D.; HASSANIPOUR, F. An experimental study on human milk rheology: behavior changes from external factors. **Fluids**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 42, 2020.
- ALMANZA-RUBIO, J. L.; GUTIÉRREZ-MÉNDEZ, N.; LEAL-RAMOS, M. Y.; SEPULVEDA, D.; SALMERON, I. Modification of the textural and rheological properties of cream cheese using thermosonicated milk. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 168, p. 223–230, 2016.
- AMARAL, G. V.; SILVA, E. K.; CAVALCANTI, R. N.; CAPPATO, L. P.; GUIMARAES, J. T.; ALVARENGA, V. O.; ESMERINO, E. A.; PORTELA, J. B.; SANT'ANA, A. S.; FREITAS, M. Q.; SILVA, M. C.; RAICES, R. S. L.; MEIRELES, M. A. A.; CRUZ, A. G. Dairy processing using supercritical carbon dioxide technology: theoretical fundamentals, quality and safety aspects. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 64, p. 94–101, 2017.
- AMATAYAKUL, T.; HALMOS, A. L.; SHERKAT, F.; SHAH, N. P. Physical characteristics of yoghurts made using exopolysaccharide-producing starter cultures and varying casein to whey protein ratios. **International Dairy Journal**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 40–51, 2006.
- AOAC INTERNATIONAL. **Official Method of Analysis**. 18. ed. Washington: Association of Official Analytical Chemists, 2005.
- ARCHER, D. G. Thermodynamic properties of synthetic sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), standard reference material and the effect of temperature-scale differences on thermodynamic properties. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 1441–1453, 1993.
- ARVANITOYANNIS, I. S.; KOTSANOPOULOS, K. V.; SAVVA, A. G. Use of ultrasounds in the food industry—Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 109–128, 2017.
- ARZENI, C.; MARTÍNEZ, K.; ZEMA, P.; ARIAS, A.; PÉREZ, O. E.; PILOSOFF, A. M. R. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 108, n. 3, p. 463–472, 2012.

ASTM INTERNATIONAL. **E1269-11**: Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken: ASTM International. 2011. 6 p.

AWUAH, G. B.; RAMASWAMY, H. S.; ECONOMIDES, A. Thermal processing and quality: principles and overview. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 46, n. 6, p. 584–602, 2007.

BARBA, F. J.; ZHU, Z.; KOUBAA, M.; SANT'ANA, A. S.; ORLIEN, V. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: a review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 49, p. 96–109, 2016.

BARUKČIĆ, I.; LISAK JAKOPOVIĆ, K.; HERCEG, Z.; KARLOVIĆ, S.; BOŽANIĆ, R. Influence of high intensity ultrasound on microbial reduction, physico-chemical characteristics and fermentation of sweet whey. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 27, p. 94–101, 2015.

BERMÚDEZ-AGUIRRE, D.; MOBBS, T.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Ultrasound Applications in Food Processing. In: FENG, H.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.; WEISS, J. (org.). **Food Engineering Series**. New York: Springer, 2011. p. 65–105.

BHARGAVA, N.; MOR, R. S.; KUMAR, K.; SHARANAGAT, V. S. Advances in application of ultrasound in food processing: a review. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 70, p. 105293, 2021.

BIENVENUE, A.; JIMÉNEZ-FLORES, R.; SINGH, H. Rheological properties of concentrated skim milk: importance of soluble minerals in the changes in viscosity during storage. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 86, n. 12, p. 3813–3821, 2003.

BIENVENUE, Annie; JIMÉNEZ-FLORES, R.; SINGH, H. Rheological properties of concentrated skim milk: influence of heat treatment and genetic variants on the changes in viscosity during storage. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 51, n. 22, p. 6488–6494, 2003.

BRANCO, I.G. **Suco de laranja concentrado: comportamento reológico a baixas temperaturas**. Orientador: Carlos Alberto Gaspareto. 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

BRASIL. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Dispõe sobre a inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, edição 62, publicado em 30/03/2017, p. 14, 2017.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 68**: Métodos Analíticos Oficiais Físico-Químicos, para Controle de Leite e Produtos Lácteos. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2006. 141 p.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 76**: Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Leite Cru Refrigerado, Leite Pasteurizado e Leite Pasteurizado Tipo A. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2018. 5 p.

CANTU-LOZANO, D.; VIGANÓ, J.; LASSMAN, A. A.; VALLEJO CANTU, N. A.; TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and drying kinetics of grapefruit seeds. **Acta Scientiarum Technology**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 717–723, 2013.

CASTRO, A. L. de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Orientador: Jefferson Liborio. 2007. 302 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO, A. G.; DIOGO, A. C.; COVAS, J. A. **Reologia e suas aplicações industriais**. 1. ed. Lisboa: Instituto Piaget, 2001. 462 p.

CHANDRAPALA, J.; MARTIN, G. J. O.; ZISU, B.; KENTISH, S. E.; ASHOKKUMAR, M. The effect of ultrasound on casein micelle integrity. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 95, n. 12, p. 6882–6890, 2012.

CHANDRAPALA, Jayani; OLIVER, C.; KENTISH, S.; ASHOKKUMAR, M. Ultrasonics in food processing. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 975–983, 2012.

CHANDRAPALA, Jayani; ZISU, B.; KENTISH, S.; ASHOKKUMAR, M. The effects of high-intensity ultrasound on the structural and functional properties of α -Lactalbumin, β -Lactoglobulin and their mixtures. **Food Research International**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 940–943, 2012.

CHANDRAPALA, J.; ZISU, B.; PALMER, M.; KENTISH, S.; ASHOKKUMAR, M. Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 951–957, 2011.

CHEMAT, F.; ZILL-E-HUMA; KHAN, M.K. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 813–835, 2011.

CHIA, J.; BURROW, K.; CARNE, A.; MCCONNELL, M.; SAMUELSSON, L.; DAY, L.; YOUNG, W.; BEKHIT, A. E. D. A. Minerals in Sheep Milk. In: WATSON, R. R.; COLLIER, R. J.; PREEDY, V. R. (org.). **Nutrients in Dairy and their Implications on Health and Disease**. Cambridge: Academic Press, 2017. p. 345–362.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on thermal properties of foods. **Journal of Food Process and Applications**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 93–101, 1986.

CHOULIARA, E.; GEORGOGIANNI, K. G.; KANELLOPOULOU, N.; KONTOMINAS, M. G. Effect of ultrasonication on microbiological, chemical and sensory properties of raw, thermized and pasteurized milk. **International Dairy Journal**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 307–313, 2010.

COSTA, A. R. da. **Propriedades termofísicas, reológicas e interfaciais de leite e soro bovino concentrados em evaporador a vácuo**. Orientadora: Jane Sélia dos Reis Coimbra. 2014. 61 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

COSTA, H. C. B.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M. Physical properties of açai-berry pulp and kinetics study of its anthocyanin thermal degradation. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 239, p. 104–113, 2018.

CRUZ, A. G.; OLIVEIRA, C. A. F.; ZACARCHENCO, P. B.; CORASSIN, C. H. **Química, Bioquímica, Análise Sensorial e Nutrição no Processamento de Leite e Derivados**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 304 p.

CUI, P.; YANG, X.; LIANG, Q.; HUANG, S.; LU, F.; OWUSU, J.; REN, X.; MA, H. Ultrasound-assisted preparation of ACE inhibitory peptide from milk protein and establishment of its in-situ real-time infrared monitoring model. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 62, p. 104859, 2020.

DAHROUD, B. D.; MOKARRAM, R. R.; KHIABANI, M. S.; HAMISHEHKAR, H.; BIALVAEI, A. Z.; YOUSEFI, M.; KAFIL, H. S. Low intensity ultrasound increases the fermentation efficiency of *Lactobacillus casei* subsp. *casei* ATTC 39392. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 86, p. 462–467, 2016.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

DARROS-BARBOSA, R.; BALABAN, M. O.; TEIXEIRA, A. A. Temperature and Concentration Dependence of Heat Capacity of Model Aqueous Solutions. **International Journal of Food Properties**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 239–258, 2003.

DE CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; DE CARVALHO, G. R.; TELIS-ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon. **Food Research International**, [s. l.], v. 100, p. 724–730, 2017.

DE CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; DE CARVALHO, G. R.; TELIS-ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part II: Merlot. **Food Research International**, [s. l.], v. 105, p. 905–912, 2018.

DELGADO JÚNIOR, I. J.; SIQUEIRA, K. B.; STOCK, L. A. **Produção, composição e processamento de leite de cabra no Brasil**. Juiz de Fora: Embrapa, 2020. v. 122. 17 p.

DEMIRDÖVEN, A.; BAYSAL, T. The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. **Food Reviews International**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 1–11, 2009.

DIAS, R. S.; BALTHAZAR, C. F.; CAVALCANTI, R. N.; SOBRAL, L. A.; RODRIGUES, J. F.; NETO, R. P. C.; TAVARES, M. I. B.; RIBEIRO, A. P. B.; GRIMALDI, R.; SANT'ANNA, C.; ESMERINO, E. A.; PIMENTEL, T. C.; SILVA, M. C.; CRUZ, A. G. Nutritional, rheological and sensory properties of butter processed with different mixtures of cow and sheep milk cream. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 46, p. 101564, 2022.

DITCHFIELD, C.; TADINI, C. C.; SINGH, R. K.; TOLEDO, R. T. Velocity and temperature profiles, heat transfer coefficients and residence time distribution of a temperature dependent Herschel–Bulkley fluid in a tubular heat exchanger. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 76, n. 4, p. 632–638, 2006.

EGAWA, E. Y. **Caracterização térmica e reológica de blendas de glicerol:colágeno tipo I de diferentes tecidos**. Orientadora: Ana Maria de Guzzi Plepis. 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciência – Química Analítica) - Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

EMBRAPA. **Anuário Leite 2020**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020. 53 p.

EVANGELISTA, R. R.; SANCHES, M. A. R.; DE CASTILHOS, M. B. M.; CANTÚ-LOZANO, D.; TELIS-ROMERO, J. Determination of the rheological behavior and thermophysical properties of malbec grape juice concentrates (*Vitis vinifera*). **Food Research International**, [s. l.], v. 137, n. 109431, p. 109431, 2020.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crops and livestock products**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 3 mar. 2022.

FELIGINI, M.; BONIZZI, I.; BUFFONI, J. N.; COSENZA, G.; RAMUNNO, L. Identification and quantification of α_{s1} , α_{s2} , β , and κ -caseins in water buffalo milk by reverse phase-high performance liquid chromatography and mass spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 57, n. 7, p. 2988–2992, 2009.

FOX, P. F. The major constituents of milk. In: SMIT, G. (org.). **Dairy Processing: Improving Quality**. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2003. p. 5–41.

GARCIA, R. V.; TRAVASSOS, A. E. R. General aspects of goat milk: a review. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, [s. l.], v. 67, n. 386, p. 81–88, 2012.

GHOSH, S. Thermosonication as an upcoming technology in the dairy industry: an overview. **Advances in Dairy Research**, [s. l.], v. 05, n. 03, 2017.

GRATÃO, A. C. A.; BERTO, M. I.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Reologia do açúcar líquido invertido: influência da temperatura na viscosidade. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 652–656, 2004.

GUIMARÃES, B.; POLACHINI, T. C.; AUGUSTO, P. E. D.; TELIS-ROMERO, J. Ultrasound-assisted hydration of wheat grains at different temperatures and power applied: Effect on acoustic field, water absorption and germination. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, [s. l.], v. 155, p. 108045, 2020.

GÜLSEREN, İ.; GÜZEY, D.; BRUCE, B. D.; WEISS, J. Structural and functional changes in ultrasonicated bovine serum albumin solutions. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 173–183, 2007.

GUT, J. A. W.; SONG, T. W. Transferência de calor por condução e convecção. *In*: TADINI, C. C.; NICOLETTI, V. R.; MEIRELLES, A. J. A. (org.). **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 325–353.

HASSAN, M.; ALI, S.; AICH, W.; KHLISSA, F.; AYADI, B.; KOLSI, L. Transport pattern of Non-Newtonian mass and thermal energy under two diverse flow conditions by using modified models for thermodynamics properties. **Case Studies in Thermal Engineering**, [s. l.], v. 29, p. 101714, 2022.

HEMAR, Y.; XU, C.; WU, S.; ASHOKKUMAR, M. Size reduction of “reformed casein micelles” by high-power ultrasound and high hydrostatic pressure. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 63, p. 104929, 2020.

HU, J.; SARI, O.; EICHER, S.; RIJA RAKOTOZANAKAJY, A. Determination of specific heat of milk at different fat content between 1°C and 59°C using micro DSC. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 90, n. 3, p. 395–399, 2009.

HUANG, G.; CHEN, S.; DAI, C.; SUN, L.; SUN, W.; TANG, Y.; XIONG, F.; HE, R.; MA, H. Effects of ultrasound on microbial growth and enzyme activity. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 37, p. 144–149, 2017.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agro 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuário/censo-agropecuário-2017>. Acesso em: 8 abr. 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa da Pecuária Municipal - PPM**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/tabelas/brasil/2020>. Acesso em: 7 abr. 2022.

INDUMATHI, A. S.; SUJATHA, G.; BASKARAN, D.; DHANALAKSHMI, B.; SARAVANA PANDIAN, A. S. Inactivation of alkaline phosphatase and shelf life extension of milk processed by hurdle technology. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, [s. l.], v. 7, n. 07, p. 3278–3281, 2018.

JALILZADEH, A.; HESARI, J.; PEIGHAMBARDoust, S. H.; JAVIDIPOUR, I. The effect of ultrasound treatment on microbial and physicochemical properties of Iranian ultrafiltered feta-type cheese. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 101, n. 7, p. 5809–5820, 2018.

JULIANO, P.; TORKAMANI, A. E.; LEONG, T.; KOLB, V.; WATKINS, P.; AJLOUNI, S.; SINGH, T. K. Lipid oxidation volatiles absent in milk after selected ultrasound processing. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 21, n. 6, p. 2165–2175, 2014.

JUMAH, R. Y.; SHAKER, R. R.; ABU-JDAYIL, B. Effect of milk source on the rheological properties of yogurt during the gelation process. **International Journal of Dairy Technology**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 89–93, 2001.

KILBRIDE, P.; RULL, M. V.; TOWNSEND, A.; WILSON, H.; MORRIS, J. Shear-thickening fluids in biologically relevant agents. **Biorheology**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 39–50, 2019.

KRISTO, E.; BILIADERIS, C. .; TZANETAKIS, N. Modelling of rheological, microbiological and acidification properties of a fermented milk product containing a probiotic strain of *Lactobacillus paracasei*. **International Dairy Journal**, [s. l.], v. 13, n. 7, p. 517–528, 2003.

LANNES, S. C. da S.; MEDEIROS, M. L.; AMARAL, R. L. Formulação de “chocolate” de cupuaçu e reologia do produto líquido. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas / Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 463–469, 2002.

LEWIS, M. J. **Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 1993. 512 p.

LIU, Y.; ZHANG, F. Changes of antibiotic resistance genes and gut microbiota after the ingestion of goat milk. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 105, n. 6, p. 4804–4817, 2022.

LOPEZ, P.; BURGOS, J. Lipoxigenase inactivation by manothermosonication: effects of sonication on physical parameters, pH, KCl, sugars, glycerol, and enzyme concentration. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 620–625, 1995.

LOPEZ, P.; BURGOS, J. Peroxidase stability and reactivation after heat treatment and manothermosonication. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 60, n. 3, p. 451–455, 1995.

MACEDO, M. P.; WECHSLER, F. S.; RAMOS, A. de A.; AMARAL, J. B. do; SOUZA, J. C. de; RESENDE, F. D. de; OLIVEIRA, J. V. de. Composição físico-química e produção do leite de búfalas da raça Mediterrâneo no oeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], v. 30, n. 3 suppl 1, p. 1084–1088, 2001.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 75–97, 1996.

MAGENIS, R. B.; PRUDENCIO, E. S.; AMBONI, R. D. M. C.; CERQUEIRA JUNIOR, N. G.; OLIVEIRA, R. V. B.; SOLDI, V.; BENEDET, H. D. Compositional and physical properties of yogurts manufactured from milk and whey cheese concentrated by ultrafiltration. **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 41, n. 5, p. 560–568, 2006.

MANZOOR, M. F.; ZENG, X.-A.; RAHAMAN, A.; SIDDEEG, A.; AADIL, R. M.; AHMED, Z.; LI, J.; NIU, D. Combined impact of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and FT-IR analysis of almond extract. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 56, n. 5, p. 2355–2364, 2019.

MARCHESINI, G.; BALZAN, S.; MONTEMURRO, F.; FASOLATO, L.; ANDRIGHETTO, I.; SEGATO, S.; NOVELLI, E. Effect of ultrasound alone or ultrasound coupled with CO₂ on the chemical composition, cheese-making properties and sensory traits of raw milk. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 16, p. 391–397, 2012.

MARCHESINI, G.; FASOLATO, L.; NOVELLI, E.; BALZAN, S.; CONTIERO, B.; MONTEMURRO, F.; ANDRIGHETTO, I.; SEGATO, S. Ultrasonic inactivation of microorganisms: a compromise between lethal capacity and sensory quality of milk. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 29, p. 215–221, 2015.

MARGULIS, M. .; MARGULIS, I. . Calorimetric method for measurement of acoustic power absorbed in a volume of a liquid. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 343–345, 2003.

MARTINS, M. J. N.; GUIMARÃES, B.; POLACHINI, T. C.; TELIS-ROMERO, J. Thermophysical properties of carbohydrate solutions: correlation between thermal and transport properties. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 9, p. 1–15, 2020.

MASON, T. J. Sonochemistry and sonoprocessing: the link, the trends and (probably) the future. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 10, n. 4–5, p. 175–179, 2003.

MCLAUGHLIN, C. P.; MAGEE, T. R. A. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 267–280, 1998.

MCMINN, W. A. M. Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 72, n. 2, p. 113–123, 2006.

MCSWEENEY, P. L. H.; FOX, P. F. **Advanced Dairy Chemistry**. 4. ed. Boston: Springer US, 2013. v. 1A. 548 p.

MEHDITABAR, H.; RAZAVI, S. M. A.; JAVIDI, F. Influence of pumpkin puree and guar gum on the bioactive, rheological, thermal and sensory properties of ice cream. **International Journal of Dairy Technology**, [s. l.], v. 73, n. 2, p. 447–458, 2020.

MÉNARD, O.; AHMAD, S.; ROUSSEAU, F.; BRIARD-BION, V.; GAUCHERON, F.; LOPEZ, C. Buffalo vs. cow milk fat globules: size distribution, zeta-potential, compositions in total fatty acids and in polar lipids from the milk fat globule membrane. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 120, n. 2, p. 544–551, 2010.

MERLIN JUNIOR, I. A.; SANTOS, J. S.; COSTA, L. G.; COSTA, R. G.; LUDOVICO, A.; REGO, F. C. de A.; SANTANA, E. H. W. Sheep milk: physical-chemical characteristics and microbiological quality. **Archivos Latinoamericanos de Nutricion**, [s. l.], v. 65, n. 3, p. 193–198, 2015.

- MIANO, A. C.; DA COSTA PEREIRA, J.; MATELO, B.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound assisted acidification of model foods: kinetics and impact on structure and viscoelastic properties. **Food Research International**, [s. l.], v. 100, p. 468–476, 2017.
- MINIM, L. A.; COIMBRA, J. S. R.; MINIM, V. P. R.; TELIS-ROMERO, J. Influence of temperature and water and fat contents on the thermophysical properties of milk. **Journal of Chemical & Engineering Data**, [s. l.], v. 47, n. 6, p. 1488–1491, 2002.
- MISHRA, K.; KOHLER, L.; KUMMER, N.; ZIMMERMANN, S.; EHRENGRUBER, S.; KÄMPF, F.; DUFOUR, D.; NYSTRÖM, G.; FISCHER, P.; WINDHAB, E. J. Rheology of cocoa butter. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 305, p. 110598, 2021.
- MORAND-FEHR, P.; FEDELE, V.; DECANDIA, M.; LE FRILEUX, Y. Influence of farming and feeding systems on composition and quality of goat and sheep milk. **Small Ruminant Research**, [s. l.], v. 68, n. 1–2, p. 20–34, 2007.
- MORENO, E.; DIALAMI, N.; CERVERA, M. Modeling of spillage and debris floods as Newtonian and viscoplastic Bingham flows with free surface with mixed stabilized finite elements. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 290, p. 104512, 2021.
- MORISON, K. R.; PHELAN, J. P.; BLOORE, C. G. Viscosity and non-newtonian behaviour of concentrated milk and cream. **International Journal of Food Properties**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 882–894, 2013.
- MUNIR, M.; NADEEM, M.; QURESHI, T. M.; LEONG, T. S. H.; GAMLATH, C. J.; MARTIN, G. J. O.; ASHOKKUMAR, M. Effects of high pressure, microwave and ultrasound processing on proteins and enzyme activity in dairy systems — a review. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 57, p. 102192, 2019.
- NADAR, S. S.; RATHOD, V. K. Ultrasound assisted intensification of enzyme activity and its properties: a mini-review. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 170, 2017.
- NETO, F. S. P. P.; DE CASTILHOS, M. B. M.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Effect of ethanol, dry extract and reducing sugars on density and viscosity of Brazilian red wines. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 95, n. 7, p. 1421–1427, 2014.
- NUDDA, A.; ATZORI, A. S.; CORREDDU, F.; BATTACONE, G.; LUNESU, M. F.; CANNAS, A.; PULINA, G. Effects of nutrition on main components of sheep milk. **Small Ruminant Research**, [s. l.], v. 184, p. 106015, 2020.
- O'DONNELL, C. P.; TIWARI, B. K.; BOURKE, P.; CULLEN, P. J. Effect of ultrasonic processing on food enzymes of industrial importance. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 21, n. 7, p. 358–367, 2010.
- OLIVEIRA, J. M. de. **Caracterização do exopolissacarídeo produzido por Mesorhizobium loti semia 816 a partir de glicerol residual**. 2017. 87 f. - Universidade Federal do Rio Grande, [s. l.], 2017.

OLIVEIRA, S. M.; GRUPPI, A.; VIEIRA, M. V.; MATOS, G. S.; VICENTE, A. A.; TEIXEIRA, J. A. C.; FUCIÑOS, P.; SPIGNO, G.; PASTRANA, L. M. How additive manufacturing can boost the bioactivity of baked functional foods. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 294, p. 110394, 2021.

ORDÓÑEZ, J. A. **Tecnología de alimentos: alimentos de origem animal**. Porto Alegre: Artmed, 2005. 280 p.

ORTEGA-RIVAS, E.; SALMERÓN-OCHOA, I. Nonthermal food processing alternatives and their effects on taste and flavor compounds of beverages. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 190–207, 2014.

PASQUEL, A. Gomas: Utilização e aspectos reológicos. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas. v. 33, n. 1, p. 86-87, 1999.

PENNA, A. L.; SIVIERI, K.; OLIVEIRA, M. Relation between quality and rheological properties of lactic beverages. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. 7–13, 2001.

PEREIRA, E. A.; QUEIROZ, A. J. de M.; DE FIGUEIRÊDO, R. M. F. Comportamento reológico de mel da abelha uruçú (*Melipona scutellaris*, L.). **Revista Ciências Exatas e Naturais**, [s. l.], v. 5, n. 2, 2003.

POLACHINI, T. C.; BETIOL, L. F. L.; BASTOS, M. G.; TELIS, V. R. N.; DE SOUZA, A. C.; TELIS-ROMERO, J. Density, thermal expansion coefficient, and rheological behaviour of meat extract under different temperatures and solids concentrations. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 94, n. 5, p. 988–994, 2016.

POLACHINI, T. C.; BETIOL, L. F. L.; BASTOS, M. G.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Boiling point and specific heat of meat extract. **International Journal of Food Properties**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 1–11, 2017.

POLACHINI, Tiago Carregari; CARVALHO, G. R. de; TELIS-ROMERO, J. Determination of acoustic fields in acidic suspensions of peanut shell during pretreatment with high-intensity ultrasound. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 385–394, 2017.

POLACHINI, T. C.; HERNANDO, I.; MULET, A.; TELIS-ROMERO, J.; CÁRCEL, J. A. Ultrasound-assisted acid hydrolysis of cassava (*Manihot esculenta*) bagasse: Kinetics, acoustic field and structural effects. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 70, p. 105318, 2021.

POLACHINI, T. C.; MULET, A.; TELIS-ROMERO, J.; CÁRCEL, J. A. Acoustic fields of acid suspensions containing cassava bagasse: influence of physical properties on acoustic attenuation. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 177, p. 107922, 2021.

POVEY, M. J. W.; MCCLEMENTS, D. J. Ultrasonics in food engineering. Part I: introduction and experimental methods. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 217–245, 1988.

PULINA, G.; MILÁN, M. J.; LAVÍN, M. P.; THEODORIDIS, A.; MORIN, E.; CAPOTE, J.; THOMAS, D. L.; FRANCESCONI, A. H. D.; CAJA, G. Invited review: Current production trends, farm structures, and economics of the dairy sheep and goat sectors. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 101, n. 8, p. 6715–6729, 2018.

QAISER, A. A.; NAZAR, R.; ANJUM, M.; SAEED, A.; ZEESHAN, M.; TAHIR, B.; MUZAFFAR, M.; JAMEEL, N. Effects of composition, temperature and shear rate on chocolate milk rheology: an empirical modeling approach incorporating yield behavior. **International Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 561–569, 2021.

RASO, J.; MAÑAS, P.; PAGÁN, R.; SALA, F. J. Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 157–162, 1999.

RODRÍGUEZ, J. J.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G. F.; DORANTES-ALVÁREZ, L.; YEOM, H. W.; ZHANG, Q. H. An update on some key alternative food processing technologies: microwave, pulsed electric field, high hydrostatic pressure, irradiation, and ultrasound. In: GUTIERREZ-LOPEZ, G. F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (org.). **Food Science and Food Biotechnology**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2003. p. 279–312.

ROSELLI, L.; CICIA, G.; CAVALLO, C.; DEL GIUDICE, T.; CARLUCCI, D.; CLODOVEO, M. L.; DE GENNARO, B. C. Consumers' willingness to buy innovative traditional food products: the case of extra-virgin olive oil extracted by ultrasound. **Food Research International**, [s. l.], v. 108, p. 482–490, 2018.

SALEHI, F. Physicochemical characteristics and rheological behaviour of some fruit juices and their concentrates. **Journal of Food Measurement and Characterization**, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 2472–2488, 2020.

SÁNCHEZ-ROMERO, M. A.; GARCÍA-CORONADO, P.; RIVERA-BAUTISTA, C.; GONZÁLEZ-GARCÍA, R.; GRAJALES-LAGUNES, A.; ABUD-ARCHILA, M.; RUIZ-CABRERA, M. A. Experimental data and predictive equation of the specific heat capacity of fruit juice model systems measured with differential scanning calorimetry. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 86, n. 5, p. 1946–1962, 2021.

SCUDINO, H.; SILVA, E. K.; GOMES, A.; GUIMARÃES, J. T.; CUNHA, R. L.; SANT'ANA, A. S.; MEIRELES, M. A. A.; CRUZ, A. G. Ultrasound stabilization of raw milk: microbial and enzymatic inactivation, physicochemical properties and kinetic stability. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 67, p. 105185, 2020.

SESHADRI, R.; WEISS, J.; HULBERT, G. J.; MOUNT, J. Ultrasonic processing influences rheological and optical properties of high-methoxyl pectin dispersions. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 191–197, 2003.

SHAKER, R. .; JUMAH, R. .; ABU-JDAYIL, B. Rheological properties of plain yogurt during coagulation process: impact of fat content and preheat treatment of milk. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 44, n. 3, p. 175–180, 2000.

SHAKERIAN, M.; KIANI, H.; EHSANI, M.-R. Effect of buffalo milk on the yield and composition of buffalo feta cheese at various processing parameters. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 15, p. 110–117, 2016.

SILVA, L. T. da S. e. **Propriedades termifísicas e comportamento reológico do leite e do soro de Búfala**. Orientadora: Jane Sélia dos Reis Coimbra. 2014. 67 f Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2014.

SILVA, M.; ZISU, B.; CHANDRAPALA, J. Influence of low-frequency ultrasound on the physico-chemical and structural characteristics of milk systems with varying casein to whey protein ratios. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 49, p. 268–276, 2018.

SINGLA, M.; SIT, N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: a review. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 73, p. 105506, 2021.

STEAD, D. Microbial lipases: their characteristics, role in food spoilage and industrial uses. **Journal of Dairy Research**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 481–505, 1986.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food engineering process**. 2. ed. East Lansing: Freeman Press, 1996. 428 p.

SURAWEERA, D.; WICHCHUKIT, S. Physico-chemical and rheological properties of plain yogurt made from goat's milk during refrigerated storage. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 187, p. 04012, 2020.

TICIANI, E.; SANDRI, E. C.; SOUZA, J. de; BATISTEL, F.; OLIVEIRA, D. E. de. Persistência da lactação e composição do leite em ovelhas leiteiras das raças Lacauene e East Friesian. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 43, n. 9, p. 1650–1653, 2013.

TONELI, J. T. de C. L.; MURR, F. E. X.; KIL, J. P. Estudo da reologia de polissacarídeos utilizados na indústria de alimentos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 181–204, 2005.

TRINH, B.; HAISMAN, D.; TRINH, K. T. Rheological characterisation of age thickening with special reference to milk concentrates. **Journal of Dairy Research**, [s. l.], v. 74, n. 1, p. 106–115, 2007.

ULUKO, H.; ZHANG, S.; LIU, L.; TSAKAMA, M.; LU, J.; LV, J. Effects of thermal, microwave, and ultrasound pretreatments on antioxidative capacity of enzymatic milk protein concentrate hydrolysates. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 18, p. 1138–1146, 2015.

VEGA-GÁLVEZ, A.; MIRANDA, M.; DÍAZ, L. P.; LOPEZ, L.; RODRIGUEZ, K.; DI SCALA, K. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 101, n. 19, p. 7265–7270, 2010.

VÉLEZ-RUIZ, J. F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Rheological properties of concentrated milk as a function of concentration, temperature and storage time. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 177–190, 1998.

VERCET, A.; ORIA, R.; MARQUINA, P.; CRELIER, S.; LOPEZ-BUESA, P. Rheological properties of yoghurt made with milk submitted to manothermosonication. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 50, n. 21, p. 6165–6171, 2002.

VERRUCK, S.; DANTAS, A.; PRUDENCIO, E. S. Functionality of the components from goat's milk, recent advances for functional dairy products development and its implications on human health. **Journal of Functional Foods**, [s. l.], v. 52, p. 243–257, 2019.

VILLAMIEL, M.; DE JONG, P. Influence of high-intensity ultrasound and heat treatment in continuous flow on fat, proteins, and native enzymes of milk. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 472–478, 2000.

WALSTRA, P. On the stability of casein micelles. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 73, n. 8, p. 1965–1979, 1990.

WALSTRA, P.; WOUTERS, J. T. M.; GEURTS, T. J. **Dairy science and technology, second edition**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. 808 p.

WU, H.; HULBERT, G. J.; MOUNT, J. R. Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 211–218, 2000.

ZIA, S.; KHAN, M. R.; ZENG, X.; SEHRISH; SHABBIR, M. A.; AADIL, R. M. Combined effect of microwave and ultrasonication treatments on the quality and stability of sugarcane juice during cold storage. **International Journal of Food Science & Technology**, [s. l.], v. 54, n. 8, p. 2563–2569, 2019.

ZURITZ, C. A.; PUNTES, E. M.; MATHEY, H. H.; PÉREZ, E. H.; GASCÓN, A.; RUBIO, L. A.; CARULLO, C. A.; CHERNIKOFF, R. E.; CABEZA, M. S. Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 71, n. 2, p. 143–149, 2005.

APÊNDICE A – Capítulo do livro eletrônico "Coleção Desafios das EngenhariasAEngenharia Química". Editora Atena, julho de 2021.

APÊNDICE B – Artigo de revista submetido " Viscosity of cow and goat raw milk, as function of chemical composition and temperature". Journal of Food Science and Technology, setembro de 2022.