

# Análise dos parâmetros operacionais da temperagem industrial do chocolate

Renata Vieira da Silva<sup>1</sup>, Gabriel Rodrigues Ferreira<sup>1</sup>, Joyce Martins Pereira<sup>1</sup>, Vinicius Gama Lidoio<sup>2</sup>

Submissão: 05/01/2022

Aprovação: 30/04/2022

**Resumo** - O chocolate é um produto de aceitação mundial consumido diariamente por grande parte da população. Sua qualidade é baseada nas variações da fabricação e processamento. O objetivo do trabalho é analisar os parâmetros operacionais da temperagem industrial do chocolate. Operar com os parâmetros adequados para cada tipo de massa no processo de temperagem significa garantir a pré-cristalização adequada da manteiga de cacau, responsável por assegurar as características de qualidade do produto final. Utilizando tais parâmetros, realizou-se uma análise exploratória e discriminante do processo de temperagem industrial convencional do chocolate, em que cada classe de massa é submetida em uma temperadeira, de modo a identificar a possibilidade de diferenciar as massas e quais parâmetros são mais contribuintes para distinção de cada classe de sabor. Essa análise foi realizada por meio de um método estatístico que submete os dados coletados do processo de temperagem à Análise de Componentes Principais (ACP), a fim de reduzir o número de variáveis originais e discriminar amostras com base na associação aos Componentes Principais. Os resultados foram satisfatórios, visto que as amostras foram plotadas em conjuntos visivelmente distintos no gráfico de scores. Também foi possível determinar a influência de cada variável do processo para cada Componente Principal e para cada classe de massa, possibilitando a realização de futuras análises preditivas.

**Palavras-chave:** Chocolate. Temperagem. Pré-cristalização. Manteiga de cacau. Análise de Componentes Principais.

## Analysis of the operational parameters of the industrial tempering of chocolate

**Abstract** - Chocolate is a product of worldwide acceptance consumed daily by a large part of the population, and its quality is based on variations in manufacturing and processing. The objective of this work is to analyze the operational parameters of the industrial tempering of chocolate. Operating with the appropriate parameters for each type of mass in the tempering process means ensuring adequate pre-crystallization of cocoa butter, responsible for ensuring the quality characteristics of the final product. Using these parameters, an exploratory and discriminating analysis of the conventional industrial tempering process of chocolate was carried out, to which each class of dough is submitted in a tempering machine, in order to identify the possibility of differentiating the masses and which parameters are most contributing to distinction of each flavor class. This analysis was performed using a statistical method that submits the data collected from the tempering process to Principal Component Analysis (PCA), in order to reduce the number of original variables and discriminate samples based on the association with Principal Components. The results were satisfactory, since the samples were plotted in visibly different sets on the score chart. It was also possible to determine the influence of each process variable for each Main Component and for each mass class, enabling the performance of future predictive analyses.

**Keywords:** Chocolate. Tempering. Pre-crystallization. Cocoa butter. Principal component analysis.

1. Graduandos em Engenharia química, Faculdade Multivix Vitória, Vitória, ES

2. Mestre em Engenharia Mecânica, Professor da Faculdade Multivix, Vitória, ES

## INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos poucos países que possuem em seu território a cadeia produtiva completa. É, simultaneamente, um dos grandes produtores de cacau, possui parques industriais de beneficiamento, além de ser um grande produtor das duas outras matérias-primas principais da indústria do chocolate, leite em pó e açúcar. Consequentemente, é um grande produtor de chocolate, possuindo um mercado consumidor consolidado entre os cinco maiores do mundo (UNESCO, 2018).

Tendo em vista que o cacau é o ingrediente principal na produção de chocolate, mais de 70% do cacau mundial é produzido no continente africano, sendo a Costa do Marfim o principal produtor. Atualmente o Brasil está na 7ª posição de maior produtor de cacau no ranking mundial, chegando a produzir anualmente cerca de 250 mil toneladas, que correspondem a 4% da produção de cacau. Além disso, em 2019, o Espírito Santo ficou entre os principais produtores (BRASIL, 2021).

Segundo a ABICAB (2021), a produção de chocolates no Brasil ficou em 189 mil toneladas durante o primeiro trimestre de 2021, o que representa um aumento de 23% em comparação com o ano anterior. Levando em consideração que o estado é o terceiro maior produtor de cacau do Brasil, a produção capixaba vem crescendo não apenas em quantidade, mas, principalmente, em qualidade. O estado conta com 25 fábricas de chocolates instaladas em seu território, que variam desde a produção artesanal à escala industrial (INCAPER, 2020).

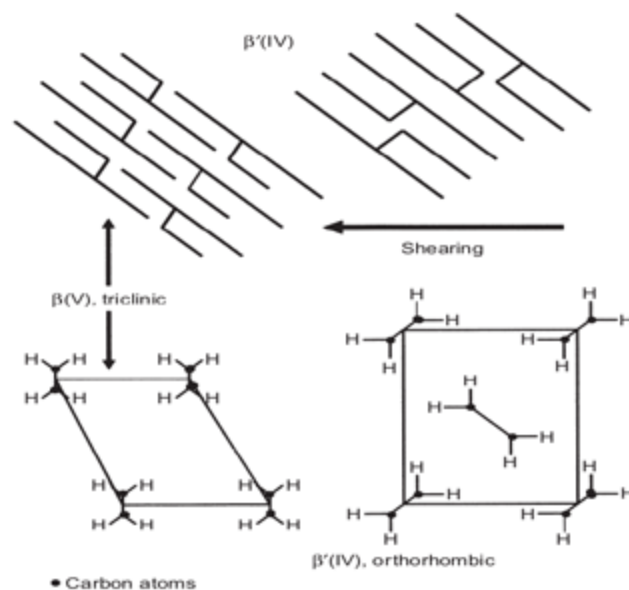
O chocolate pode ser definido como uma suspensão semi-sólida, em que o açúcar e cacau representam as partículas sólidas não gordurosas. Nesse caso, a fase gordurosa contínua é representada pela manteiga de cacau. Quando exposto à temperatura ambiente (20-25°C), apresenta consistência

sólida, porém, ao ser submetido ao paladar, reage à temperatura corporal (~37°C) e funde-se, resultando num produto altamente viscoso (BECKETT, 2008).

O controle da cristalização é crucial para atribuir cor, textura, perfil de fusão, aparência brilhante ou lustrosa, longa validade, fácil retirada dos moldes no resfriamento e resistência ao manuseio e outras características de qualidade do chocolate, que são essenciais para atração de consumidores. Os parâmetros de qualidade são obtidos por meio do processo de temperagem (HARTEL et al., 2018).

A natureza polimórfica da manteiga de cacau torna seu sistema de cristalização um complexo processo a ser estudado. O processo supracitado ocorre em condições controladas e é responsável pela exposição da manteiga de cacau a determinadas mudanças temperaturas específicas e procedimentos mecânicos, que levam a sua pré-cristalização, produzindo os cristais na forma mais estável. O processo de temperagem que é efetuado fora dos parâmetros operacionais preestabelecidos, resulta num produto com pouca resistência ao calor, um processo de cristalização mais demorado e alta probabilidade de ocorrência de fat bloom (aspecto de película branca e embaçada na superfície do chocolate). É importante ressaltar que os parâmetros operacionais do processo são individuais para cada classe de massa de chocolate (REBELO, 2002).

A manteiga de cacau é geralmente descrita por seis diferentes formas polimórficas chamadas de  $\gamma$  (I),  $\alpha$  (II),  $\beta'$  (III),  $\beta'$  (IV),  $\beta$  (V) e  $\beta$  (VI), que possuem diferentes pontos de fusão e estão relacionadas a sua estabilidade termodinâmica (Figura 1). O processo de pré-cristalização visa atingir a estrutura cristalina correta da forma  $\beta$  (V), posto que é a estrutura de empacotamento mais estável frente às oscilações de temperatura (PIROUZIAN et al., 2020).



**Figura 1.** Transformação polimórfica do polimorfo  $\beta'$  (V)  $\rightarrow$   $\beta$  (V) da manteiga de cacau.

**Fonte:** Möckli (2016)

Considerando que têmpera controlada, atingindo as condições operacionais ideais do processo, seguida do resfriamento a temperatura adequada da massa, unida à temperatura adequada dos moldes, garantem que a forma cristalina polimórfica mais estável  $\beta$  (V) da manteiga de cacau seja predominante (Figura 1) e que são parâmetros intrínsecos a cada classe de massa, supõe-se que é possível identificar o sabor de uma amostra desconhecida de massa de chocolate por meio da aplicação da Análise de Componentes Principais nos parâmetros operacionais do processo de temperagem (REBELO, 2002).

Esse tipo de análise estatística tem elevada aplicabilidade no campo de Engenharia de Alimentos, mais especificamente no estudo dos processos relacionados à manufatura de chocolate. Autores como Onelli (2021) aplicam a ACP, a fim de diferenciar as amostras de chocolates produzidos com amêndoas sem torra e torradas. Silva (2013) apresenta o perfil sensorial dos chocolates amargos produzidos com 23 variedades de cacau por meio de ACP. E Augusto (2017) utiliza a ACP, a fim de evidenciar as diferenças das amostras de chocolate feitas com açaí liofilizado das feitas com açaí atomizado.

A ACP consiste em um método que utiliza a estatística multivariada para conversão de variáveis. Uma das aplicações dessa técnica objetiva a geração de

índices e agrupamento de indivíduos. Dessa forma, de acordo com a variação dos indivíduos, é possível agrupá-los conforme seu comportamento dentro da população, permitindo ressaltar tendências e padrões intrínsecos ao conjunto de dados e identificar quais os fatores mais influentes para cada padrão (HONGYU; SANDANIELO; JUNIOR, 2016).

O objetivo geral da presente pesquisa é realizar uma Análise de Componentes Principais para explorar a possibilidade de discriminação de classes distintas de massa de chocolate (massa leite, massa branca e massa amarga) por intermédio dos parâmetros operacionais do processo de temperagem, identificando quais parâmetros são mais influentes para cada massa.

Os objetivos específicos são a caracterização do processo de temperagem, com análise do comportamento polimórfico da manteiga de cacau; coleta dos parâmetros operacionais relacionados à têmpera (temperatura de entrada de massa, temperatura da água de resfriamento, temperatura de têmpera, temperatura da água reaquecimento, temperatura de saída de massa, temperatura de aquecimentos dos moldes, temperatura do boiler, temperatura do tanque de serviço, temperatura do túnel de resfriamento e temperatura da tubulação) para cada classe de massa; análise de têmpera pelo termômetro digital de todas as amostras de massa de chocolate

coletadas, para garantir a conformidade do processo de temperagem; e, por fim, realização da Análise de Componentes Principais (ACP) dos dados coletados para interpretação dos resultados.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### POLIMORFISMO

Uma substância solidificada pode apresentar diferentes formas em seus cristais. Essa característica de determinadas substâncias é denominada polimorfismo. Isso significa que, apesar de possuir a mesma composição química, cada polimorfo apresenta uma estrutura cristalina distinta, que confere à substância propriedades químicas e físicas diferentes de acordo com o polimorfo apresentado (GREPIONI, 2008; SILVA, 2018).

Como resultado das diferentes propriedades apresentadas pelas estruturas cristalinas distintas, as interações intra e intermoleculares são distintas, assim como os arranjos tridimensionais de empacotamento cristalino. É, portanto, fundamental caracterizar as várias formas polimórficas de uma dada substância sob o ponto de vista termodinâmico e cinético (GREPIONI, 2008).

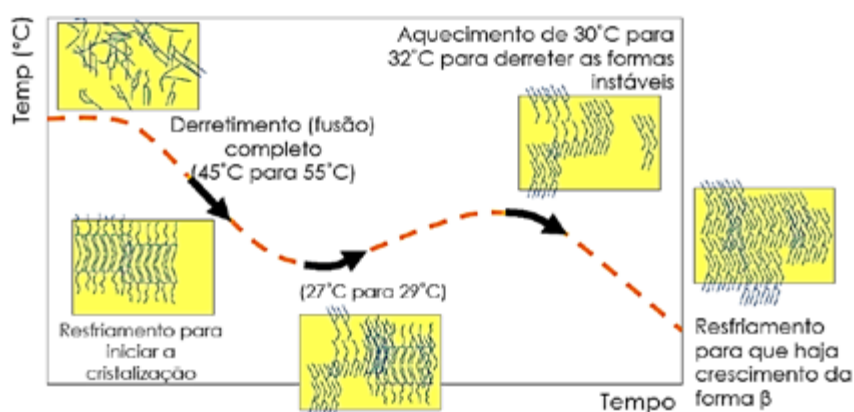
A cristalização consiste no aparecimento desses arranjos de cristais ordenados microscópicos de molé-

culas. Esses arranjos aparecem distribuídos aleatoriamente na substância no processo de pré-cristalização e na cristalização em si. Eles, então, são replicados para o resto da substância (ZALLEN, 1983).

### POLIMORFISMO DA MANTEIGA DE CACAU

A fase contínua do chocolate apresenta composição predominante de manteiga de cacau. Além disso, a manteiga de cacau também é responsável pela dispersão dos ingredientes do chocolate. Comparada com as gorduras vegetais, a manteiga de cacau possui componentes e cristalização únicos, apresentando, portanto, em suas propriedades físico-químicas, a maior importância para produção de chocolate (LIPP; ANKLAM, 1998).

O tipo de cristal formado (polimorfo) e a forma como um elemento se comporta em temperaturas dentro de sua faixa de fusão são influências de suas propriedades físicas. O Polimorfismo é a denominação para as diferentes formas possíveis das moléculas de um cristal se organizarem em uma estrutura de empacotamento. Dessa forma, a manteiga de cacau se classifica como um sistema polimórfico e permite, de acordo com a temperatura de arrefecimento durante sua cristalização, a formação de diferentes formas polimórficas. Um processo de temperagem adequado permite que a manteiga de cacau se comporte conforme ilustrado na Figura 2, resultando numa estrutura cristalina estável  $\beta$  (V) (REBELO, 2002).



**Figura 2.** Perfil de cristalização da manteiga de cacau durante a temperagem.

**Fonte:** O autor (2021)

Segundo Vaeck (1960, apud Ferreira et al., 2019), a manteiga de cacau pode apresentar até seis estruturas de empacotamento distintas, classificadas como  $\gamma$  (ponto de fusão a 17°C),  $\alpha$  (pontos de fusão 21°C-24°C),  $\beta'$  (ponto de fusão 28°C) e  $\beta$  (pontos de

fusão de 34°C-36°C), como ilustra a Tabela 1. A forma beta é classificada como a portadora de maior estabilidade diante à variabilidade de temperatura. Portanto, é considerada a mais adequada para obtenção de um chocolate de alta qualidade.

**Tabela 1.** Polimorfos da manteiga de cacau

Estrutura	Ponto de fusão (°C)	Estrutura de comprimento da cadeia	Estabilidade
$\gamma$ (I)	17,3	Dupla	Instável
$\alpha$ (II)	23,3	Dupla	Instável
$\beta'$ (III)	25,5	Dupla	Instável
$\beta'$ (IV)	27,5	Dupla	Metaestável
$\beta$ (V)	33,8	Tripla	Estável
$\beta$ (VI)	36,3	Tripla	Mais estável

**Fonte:** Vaeck (1960, apud Ferreira et al., 2019)

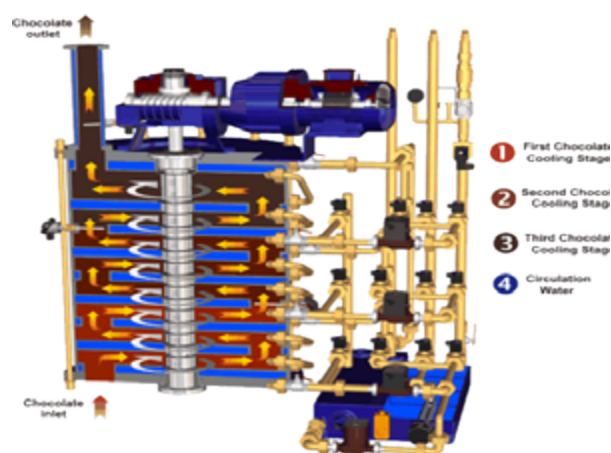
### PROCESSO DE TEMPERAGEM (PRÉ-CRISTALIZAÇÃO)

É na temperadeira que a forma do cristal polimórfico, bem como o tamanho e o número de núcleos de cristal são inicialmente determinados. Em complemento a esse estágio, há três parâmetros envolvidos: agitação, arrefecimento e tempo de residência (SEGUINE, 1991).

A agitação proporciona um efeito triplo de maior transferência de calor para fora do chocolate e para o meio de refrigeração, maior movimento molecular eficaz, permitindo que a ação do núcleo prossiga mais rapidamente, além de maior pressão que aumenta a formação da forma polimórfica mais estável, a beta (SEGUINE, 1991).

Por conseguinte, é necessário estabelecer uma pré-cristalização em ótimas condições para obter a quantidade suficiente de polimorfos  $\beta$  (V). A eficiência da mistura, taxas de transferência de massa e taxas de transferência de calor são influenciadas pela agitação ou taxa de agitação aplicada na pré-cristalização (PIROUZIAN et al., 2020).

Na maioria das indústrias, o chocolate é temperado continuamente, passando por uma série de trocadores de calor de superfície raspada que expõem o chocolate derretido a um perfil térmico controlado, como o sistema ilustrado na Figura 3. A temperatura apropriada é aplicada para não provocar o aumento da temperatura (HARTEL et al., 2018).

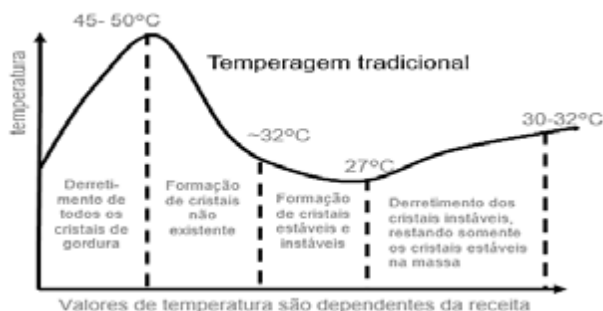


**Figura 3.** Visão global de um sistema de temperagem

**Fonte:** Chocolate, confectionery machinery, plants & engineering (s/a)

Como regra geral, após o derretimento completo sem nenhuma fase cristalina presente (45-50°C), o chocolate é arrefecido a 32°C no primeiro trocador de calor. O produto é arrefecido um pouco mais nos permutadores intermediários. Nessa fase, a cristalização ocorre com mistura de polimorfos e, por fim, na última fase, o chocolate é reaquecido para transformar os polimorfos instáveis no desejado e estável  $\beta$  (V) cristais de sementes. Durante a fase final da temperagem, a temperatura do chocolate é elevada,

a fim de fundir os cristais instáveis, restando apenas estáveis, cristais  $\beta$  (V). A temperatura de fusão da manteiga de cacau varia entre 26°C a 36°C e está relacionada à estrutura do cristal formado durante o resfriamento. Portanto, as formas instáveis, que fundem a temperaturas mais baixas, são eliminadas no processo de reaquecimento que ocorre na zona três da temperagem. Uma visão geral sobre esse processo é apresentada pela Figura 4 (SLETTEN-GREN, 2010).



**Figura 4.** Visão global sobre temperagem convencional

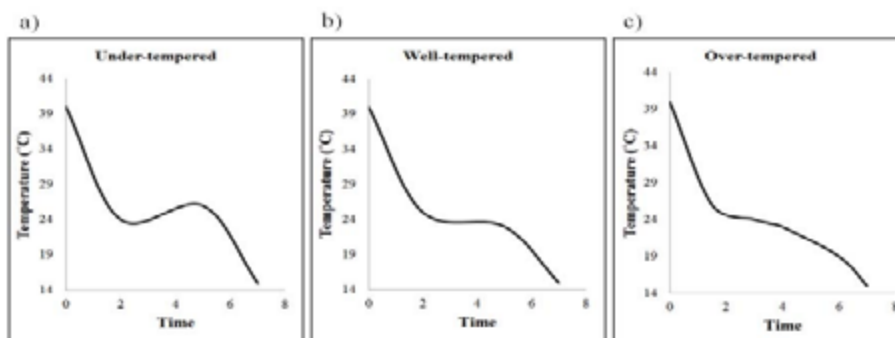
Fonte: O autor (2021)

## TEMPERÍMETRO

Temperímetros são equipamentos capazes de quantificar a temperagem do chocolate, indicando-a por meio da curva de resfriamento. A curva objetiva indica, por meio da inclinação, a quantidade de calor latente de cristalização liberado durante a solidificação da massa de chocolate no interior do temperímetro, e, por comparação com curvas padrões, tem-se uma indicação do índice de temperagem do produto (GRUNENVALDT, 2009).

Tem-se um chocolate com a têmpera correta da manteiga de cacau, quando a quantidade de calor produzido pela cristalização está em equilíbrio com

o calor que é removido no resfriamento. Quando uma quantidade insuficiente de cristais for produzida na temperagem, a amostra submetida ao temperímetro libera mais calor de cristalização do que remove no resfriamento, uma vez que muitos cristais irão se formar no resfriamento do temperímetro. Nessa situação, a amostra é considerada subtemperada. Já quando a amostra forma quantidade excessiva de cristais no processo de temperagem, o calor latente de cristalização liberado durante o resfriamento do temperímetro não compensa o calor removido pelo sistema de resfriamento do equipamento, desse modo, a amostra é classificada como sobretemperada. As curvas de têmpera são representadas assim como na Figura 5 (MIYASAKI, 2013).



**Figura 5.** Curva de têmpera: a) Chocolate subtemperado, b) Chocolate bem temperado e c) Chocolate sobretemperado

Fonte: Lindecrantz (2014)



## ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

Com a finalidade de melhorar o resultado dos processos e reduzir o número de testes da investigação experimental, sem a perda de análises importantes e essenciais para a boa descrição de bons padrões, bem como o fato de proporcionar a menor necessidade de análises, gerando uma economia de recursos materiais e financeiros, o prévio planejamento e análises de experimentos utilizando técnicas fundamentadas em teoria de estatísticas avançadas, são essenciais (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

Por meio dessa prática é possível identificar as variáveis controladoras ou fatores que mais afetam os parâmetros de interesse, que seriam as variáveis de resposta de um dado processo. Também é possível encontrar condições otimizadas para o processo por intermédio da atribuição de valores às variáveis mais influentes, proporcionando a menor variabilidade do parâmetro de interesse. Entretanto, também podem ser atribuídos valores a fatores do processo, reduzindo o efeito de ruído de variáveis que não podem ser controladas (PASQUINI, 2003).

O método matemático de Análise de Componentes Principais (ACP) tem por característica o estudo dos dados utilizados, representando-os a partir de combinações lineares das variáveis originais. Para essa técnica de estatística multivariada é utilizada uma modelagem de estrutura de covariância com objetivo de reduzir e correlacionar um dado conjunto de variáveis originais em outro conjunto de componentes principais com a menor perda de informação possível. Possibilitando identificar e visualizar uma relação entre os dados da amostra (HONGYU; SANDANIELO; JUNIOR, 2016).

Nessa técnica é utilizada princípios de álgebra linear e estatística multivariada, a fim de separar amostras de acordo com suas características comportamentais a partir de um dado conjunto de amostra. Os agrupamentos encontrados são denominados componentes principais, enquanto a amostra seria o componente original (HONGYU; SANDANIELO; JUNIOR, 2016).

O cálculo da análise de componentes principais começa com dados de 'p' variáveis de 'n' amostras. Esses dados são então colocados na forma de matriz, como ilustra a Figura 6, de ordem 'n x p' (VARELLA, 2008).

Figura 6 - Matriz X de característica x indivíduos

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2p} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

Fonte: VARELLA (2008)

A partir da Matriz X, encontra-se a matriz de covariância e a matriz de correlação, a fim de obter as componentes principais. Após encontrar essas componentes, é possível inserir as variáveis em um gráfico como biplot. Esse tipo de gráfico é empregado principalmente em análises exploratórias multivariadas, representando dois ou mais componentes principais. E é a partir dele que pode ser observada uma relação entre as variáveis, em que a distância entre os pontos pode indicar a correlação entre eles (VARELLA, 2008; BRAGA, 2019).

## MATERIAIS E MÉTODO

Tendo em vista os propósitos e objetivos supracitados, a pesquisa se baseia no método de abordagem hipotético-dedutivo, de objetivo exploratório e abordagem quantitativa, com procedimentos estatísticos e bibliográficos que buscam explorar, avaliar e discriminar três classes de massas de chocolate por meio da técnica de Análise de Componentes Principais (GIL, 1991).

A metodologia foi dividida em duas partes: construção da base de dados e aplicação da Análise de Componentes Principais.

### CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS

No processo de temperagem explorado são controlados os seguintes parâmetros: temperatura de entrada de massa (Min), temperatura da água de resfriamento (CoW), temperatura de têmpera (TeW), temperatura da água reaquecimento (ReW), temperatura de saída de massa (Mout), temperatura de aquecimentos dos moldes (M), temperatura do boiler (B), temperatura do tanque de serviço (SerT), temperatura do túnel de resfriamento (CoT) e temperatura da tubulação (T).

Os parâmetros supracitados são checados a cada hora. Os dados utilizados na Análise de Componentes Principais foram coletados durante um período de 14 dias para seguir o plano de produção das massas ao leite, branca e amarga. Todos os dados utilizados para construção da base de dados tiveram amostras coletadas para retirada da curva de têmpera e índice de têmpera no termômetro digital, e nenhum dado fora do range foi identificado.

### APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para a obtenção da combinação linear dos dados, deve-se, primeiramente, ordenar os dados na forma de matriz com “n” amostras e “p” variáveis, de acordo com o modelo demonstrado na Figura 6 (HONGYU; SANDANIELO; JUNIOR, 2016).

O conjunto de dados sobre o processo de temperagem conta com dez variáveis estudadas, apresentadas por: X1: Min; X2: ReW; X3: CoW; X4: Mout; X5: TeW; X6: M; X7: B; X8: SerT; X9: CoT; X10: T. A escolha dessas variáveis foi baseada nos parâmetros de têmpera que são controlados durante o processo de moldagem do chocolate.

Todo o equacionamento da ACP foi realizado utilizando o software MATLAB R2015a, cuja função para realização da ACP é pronta (PCA toolbox). Os dados da matriz X são normalizados usando a função `normalize` no MATLAB. A média empírica de cada coluna é calculada e posteriormente os desvios da média. Esses valores de desvio são utilizados para estruturar a matriz de covariância ( $n \times p$ ). Em seguida, os autovalores e autovetores são determinados por meio da matriz de covariância. Os autovalores, que representam as componentes principais, são classificados em ordem decrescente, de modo a calcular o peso para cada autovetor. Dessa forma, o software representa por meio de um gráfico de dispersão, a contribuição de cada componente principal para cada amostra (MASKARA, 2020).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os dados coletados das três classes de massa, sendo o produto 1, massa branca; o produto 2, massas ao leite; e o produto 3, massas amargas.

Tabela 2 – Parâmetros operacionais do processo de temperagem

Amostra	Produto	Min	ReW	CoW	Mout	TeW	M	B	SerT	CoT	T
1	1	40,7	29,9	9,4	29,5	29	29,8	33,4	42	8,5	31,4
2	1	40,3	29,8	9,3	29,2	29	29,8	33,3	42	8,9	31,5
3	1	40,7	30,1	9,5	29,7	29,2	29,9	32,4	42	8,8	31,5
4	1	40,6	30,1	9,4	29,8	29,3	29,2	31,7	42	8,8	31,5
5	1	40,6	30,3	9,6	29,8	29,2	30,2	33,3	42	8,7	31,5
6	1	40,4	30,5	9,9	30,4	30,5	29,7	33,4	42	8,7	31,5
7	1	40,3	31	10,2	31,2	30,8	29,8	33	42	8,8	31,5
Amostra	Produto	Min	ReW	CoW	Mout	TeW	M	B	SerT	CoT	T
8	1	42	30	8,5	30,5	29	29,9	33	43	9,5	31,5
9	1	42	30	8,5	30	29	29	33	43	9,5	31,5
10	1	42	29,5	9	30,5	29,5	29	33	43	8,5	31,5



11	1	42	30	9	30,5	30	29	33	43	9,5	31,5
12	1	42	30	9	29,8	30	29	33,5	42	8,5	31,5
13	1	40,1	30,2	9,6	29,8	29	29	32,7	42	8,8	31,5
14	1	40,4	30,3	9,1	30,3	29,9	29,8	33,2	42	8,8	31,8
15	1	40,2	30,2	9,5	30,3	29,4	29,7	32,7	42	8,8	31,5
16	1	40,3	30,3	9,5	30,3	29,7	29,2	33,4	42	8,5	31,5
17	1	40,2	30,4	9,6	30,2	29,8	29,8	32,9	42	8,8	31,8
18	1	40,1	30,2	9,4	30	29,3	29,7	33,1	42	9,1	31,5
19	1	40,1	30,2	10,1	30,1	29,7	29,7	32,7	42	8,8	31,4
20	1	40	31	10,4	30,9	30	29,3	33,2	43	8,5	31,6
21	1	40,2	31	10,5	31,2	30,6	29,7	33,7	43	8,9	31,6
22	1	40	30,5	10,5	30,8	29,9	29,9	32,4	43	8,7	31,5
23	1	41,2	30,5	10,6	29,1	29,5	29,3	33,6	43	8,7	31,5
24	1	40,9	30,5	10,6	29,6	29,5	29,3	33,3	43	8,5	31,5
25	1	40,1	30,5	9,8	30,3	29,8	29,7	33,5	42	8,8	31,5
26	1	40,3	30,4	9,7	30,2	29,8	29,4	33,1	42	8,8	31,5
27	1	40,2	31	9,8	31,2	30,3	29,9	33,2	42	8,8	31,6
28	1	40,3	30,5	10,4	30,3	29,9	29,8	33,8	42	8,9	31,6
29	1	40,3	30,4	9,8	30,1	29,8	29,8	32,3	42	8,8	31,5
30	1	40,1	29,5	9,3	30,3	30,7	29,8	32,8	42,1	8,5	31
31	1	40	29,8	8,5	29,8	29	29,3	33,3	42,3	8,5	31,3
32	1	40	29,9	8,5	29,6	29	29,8	33,3	42,4	8,5	31
33	1	40,1	30	10,5	29,4	29	29,8	32,7	42	8,8	31,5
34	1	40,3	30,5	10,5	30,1	29,3	29,8	33,3	43	8,8	31,5
35	1	40,2	30,1	9,2	29,4	29	28,8	33,1	42,4	8,5	31,5
36	1	40,3	30	9,1	29,4	29	29,6	32,9	42,2	8,5	31,5
37	1	40,2	30	9	29,4	29	28,5	32,3	42,2	8,5	31,5
38	1	40,3	30,1	8,9	29,3	29,8	28,9	32,8	42,1	8,5	31,5
Amostra	Produto	Min	ReW	CoW	Mout	TeW	M	B	SerT	CoT	T
39	1	40	30	9,5	30	29,8	29	33	44	9,5	31,5
40	1	40	30	9,6	30,5	29,8	29	33	44	9,5	31,5
41	1	41	30	10	30	29,9	29	33,5	43	9,5	31,5
42	1	42	30	10	29,9	29,5	29	33,5	42	9,5	31,5
43	1	43	30	10	30	29,6	29	33,5	43	9,5	31,5
44	1	41,5	29,9	10	29,9	29,5	29	33,5	43	9,5	31,5
45	1	41,8	30	10	29,4	29,5	29	33,5	43	9,5	31,5
46	2	40,1	29,9	9	29,4	29,1	30,1	32,2	42,1	8,5	31,6
47	2	40	30	9	29,4	29	29,4	32,6	42,7	8,5	31,6
48	2	40,1	29,9	9,1	29,8	30,2	29,4	32,9	42	8,9	31,5
49	2	40	30	9	29,5	29	29	32,5	43	8,5	31,5
50	2	40,1	30,1	9	29,2	29	28,9	33,3	42	8,5	31,6

51	2	40,1	29,9	8,8	28,9	29,6	29,3	33,2	42	8,7	31,7
52	2	40,4	29,5	8,8	30,2	30,3	29,2	32,6	42	8,9	31,1
53	2	40	29,5	8,5	30	29	29,5	32,5	43	8,5	31
54	2	40,3	29,5	9	29	29,4	29	32,5	43	8,5	31,5
55	2	40	29,5	9	30,3	29,4	29	32,5	43	8,5	31
56	2	42	31	8	31	31	29	33	43	9,5	31,5
57	2	40	30	8	29,9	29,5	29	33	43	9,5	31,5
58	2	40,1	30	8,5	29,8	31,5	29,8	33	42	9,5	31,5
59	2	40,1	30,1	8	29,7	29,5	29,8	33,9	42	9,4	31,5
60	2	40,1	30	8,1	29,7	29,5	29,8	33,4	42	9,5	31,5
61	2	40,1	30	8	29,8	29,5	29,6	33,5	42	9,4	31,5
62	2	40,1	30	8,2	29,8	29,5	29,5	33,6	42	9,5	31,5
63	2	40,1	30,1	8	29,9	29,5	29,7	33,5	42	9,5	31,5
64	2	40,1	30	8	30	29,5	29,8	33	42	9,4	31,5
65	2	40,1	29,9	8	30,1	29,7	28,7	32,7	42	9,4	31,5
66	2	40	30	8,2	30	29,5	29	33	42	9,5	31,5
67	2	40	30	8,3	29,9	29,5	29	33	43	9,5	31,5
68	2	40	30	8,2	30	29,5	29	33	43	9,5	31,5
69	2	40	30	8,3	29,9	29,5	29	33	43	9,5	31,5
Amostra	Produto	Min	ReW	CoW	Mout	TeW	M	B	SerT	CoT	T
70	2	40	30	8,7	30	29,5	29	33	44	9,5	31,5
71	2	41	30	8,5	30	29,7	29	33	44	9,5	31,5
72	3	42	29,5	9	29,6	30	29	33,4	43	8,5	31,5
73	3	41	30,5	9,5	29,8	29,5	29	33,4	43	8,5	31,5
74	3	40,5	30,6	9,5	30	29	29,9	33,6	42	8,9	31,5
75	3	41	30,5	9,8	31,5	29,5	29,1	33,3	43	8,5	31,5
76	3	40,9	30,6	10	30,3	29,7	29,5	33,5	42	8,9	31,6
77	3	40,8	30,6	10,2	30,3	29,6	30,3	33,4	42	8,9	31,6
78	3	40,3	30,1	10,4	30,3	29,8	30,2	32,4	42	8,7	31,8
79	3	40,1	29,9	9,8	30,2	29,9	29,4	33,2	42	8,9	31,5
80	3	40,1	30,2	10,4	29,8	29,6	29,7	32,4	42	8,9	31,5

Fonte: O autor (2021)

A ACP descreve, em termos geométricos das componentes principais, a covariância das variáveis usando um menor número de variáveis. O novo subsistema consiste em eixos das componentes principais, sendo as coordenadas das amostras nesses novos eixos denominados de scores. Tendo em vista que cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais, os coeficientes dessas variáveis são chamados de loadings (GODINHO, 2007).

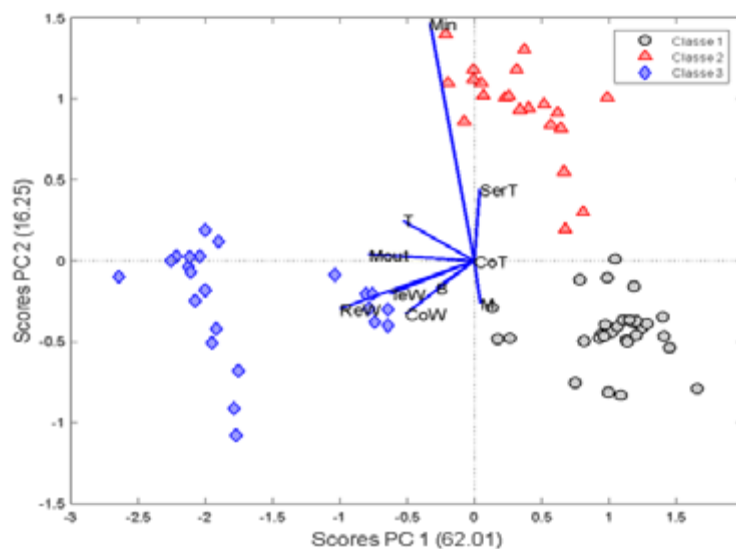
Ou seja, a partir das dez variáveis originais analisadas no processo de temperagem, a ACP reduz a matriz multivariada X a um gráfico bidimensional que representa as variáveis originais como duas Componentes Principais genéricas. Juntas, as Componentes Principais representam determinado percentual das características do sistema original, sendo a Componente Principal 1 representada pelo eixo X e a Componente Principal 2 pelo eixo Y (Figura 7).

Devido a redução da dimensionalidade das amostras, a análise direciona para que as Componentes Principais contêm as informações mais importantes sobre a amostra, enquanto as demais informações são armazenadas nas componentes subsequentes do sistema (BEEBE et al, 1998).

Para a interpretação de cada Componente Principal, é necessário examinar a magnitude e a direção dos coeficientes das variáveis originais (cargas fatoriais) que estão representados em forma de vetores, com módulo, direção e sentido definidos. Quanto maior o valor absoluto do coeficiente, mais influente será a variável ao calcular a componente. Vale ressaltar que ao realizar associações positivas com a Compo-

nente Principal, trata-se de uma variável com influência direta à respectiva Componente. Isto é, o sentido da variável influencia diretamente a caracterização da massa, e, conseqüentemente, sua disposição no gráfico. De forma contrária, ao realizar associações negativas com a Componente Principal, significa tratar de uma variável com influência indireta na caracterização da massa, justificando a dispersão dos parâmetros (GODINHO, 2007).

A Figura 7 apresenta um gráfico Biplot, o qual sobrepõe o gráfico de scores e o gráfico de cargas fatoriais, e, por meio dessa representação, correlaciona-se cada variável original com suas magnitudes e direção dos coeficientes.



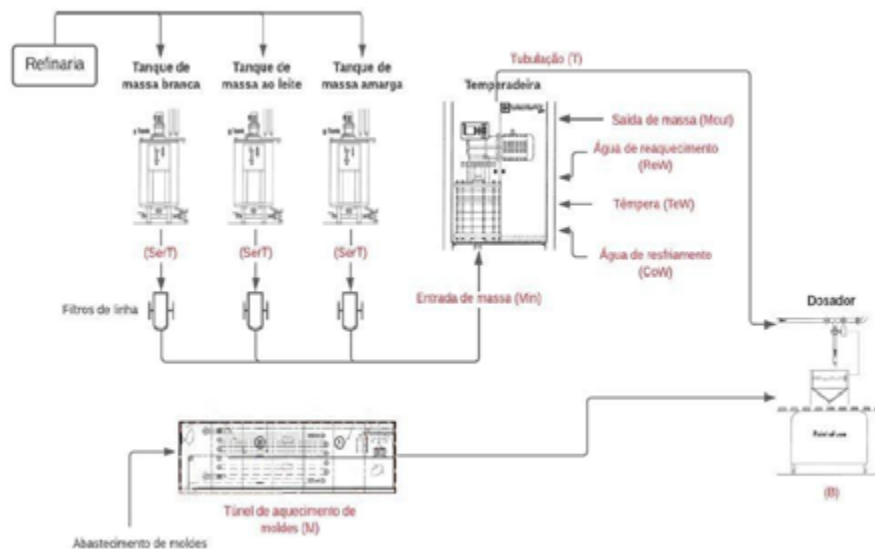
**Figura 7.** Magnitude e direção das variáveis originais

**Fonte:** O autor (2021)

A partir do gráfico biplot é possível interpretar que a Componente Principal 1 (PC 1) descreve 62,01% da variância total dos dados e possui associação negativa com a temperatura da água de reaquecimento (ReW). Também é possível inferir que PC 1 é associada negativamente com a temperatura de saída da massa (Mout), temperatura de têmpera (TeW), temperatura da água de resfriamento (CoW) e temperatura da tubulação (T). Portanto, essa componente está associada aos parâmetros de temperatura diretamente do processo no decorrer da temperadeira.

A Componente Principal 2 (PC 2) está positivamente associada com a temperatura de entrada da massa (Min) e com a temperatura do tanque de serviço

(SerT), e associada negativamente com a temperatura de aquecimento dos moldes (M). Isto é, PC 2 está associada ao processo anterior à temperadeira, em que é realizado o controle da temperatura para entrada da massa no processo de temperagem. A temperatura do túnel de resfriamento (CoT) não possui valor expressivo na influência das componentes principais do sistema por estar mais próximo ao ponto zero da Figura 07. Para melhor associação dos resultados da ACP com as etapas da produção de chocolate, a Figura 8 apresenta um fluxograma com as etapas do processo de moldagem do chocolate até o estágio de dosagem, com detalhamento das variáveis analisadas na ACP.

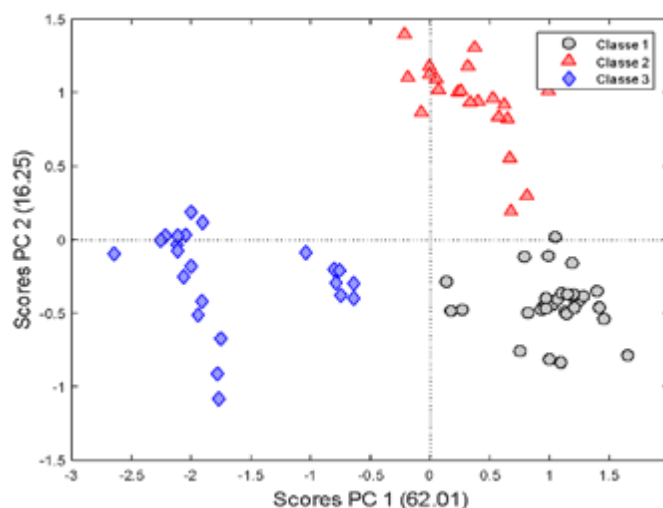


**Figura 8.** Etapas da moldagem do chocolate

**Fonte:** O autor (2021)

Além disso, o gráfico Biplot também descreve a influência de cada variável para as classes de massa. É possível inferir que Min e SerT contribuem para o agrupamento da Classe 2; ReW, Mout, TeW e CoW contribuem no agrupamento da classe 3; enquanto somente M tem certa influência para o agrupamento da classe 1. Essa associação é feita a partir da direção das cargas fatoriais.

A matriz de dados dos histogramas médios para cada tipo de massa de chocolate foi centrada na média, e a variância total é explicada em 78,26% para as duas componentes principais. As disposições das variáveis nas duas componentes principais, para cada categoria, constam no gráfico de scores representado pela Figura 9.



**Figura 9.** Agrupamento das variáveis com base nas Componentes Principais

**Fonte:** Autor (2021)

A partir do gráfico da Figura 9 é possível identificar a classe da massa de acordo com a disposição das variáveis entre os eixos das Componentes Principais PC1 e PC2, em que a classe 1 (massa branca) possui a tendência de permanecer na parte positiva da PC 1 e negativa da PC 2. A classe 2 (massa ao leite) possui tendência a manter-se na parte positiva das duas componentes. Por fim, a classe 3 (massa amarga) concentra-se principalmente na parte negativa de ambas as componentes.

Deve-se ressaltar que grande parte das pesquisas enfocam em diferenciar as propriedades físicas das diferentes massas de chocolate por meio de análises na composição química das massas. Assim como estudado por Ligeza et al. (2018), a composição do chocolate possui influência direta no seu perfil de fusão. Por meio de análises calorimétricas e termogravimétricas da curva de fusão das massas de chocolate, o estudo demonstrou queda na temperatura de fusão do chocolate ao leite em relação ao chocolate amargo, devido a presença de gordura láctea e uma queda ainda maior do chocolate branco, devido à falta de liquor de cacau em sua composição e elevado percentual de gordura láctea.

A distinção das massas branca e ao leite em relação à massa amarga era esperada. As separações ocorreram, possivelmente, pela semelhança entre as formulações das massas branca e ao leite, as quais apresentam uma maior proporção de sólidos oriundos do leite, enquanto a massa amarga apresenta grandes quantidades de sólidos provenientes do cacau, sendo, portanto, características vitais para a determinação das massas. De modo geral, foi possível determinar que a metodologia de análise utilizada é eficiente na diferenciação das amostras. Embora a variação na proporção de gordura láctea adicionada ao chocolate, nas diferentes formulações, possa ser pequena, o método foi capaz de identificar e, conseqüentemente, distinguir amostras com maiores teores de gordura láctea de amostras com menores teores e amostras não adicionadas da farinha (OLIVEIRA, 2016).

O presente estudo se baseou na caracterização das diferenças de composição das classes de chocolate por meio de uma análise nas distinções entre as propriedades termodinâmicas das massas, estudadas pelo processo de temperagem. A análise foi realizada por meio de uma ACP com os parâmetros obtidos do processo de temperagem.

## CONCLUSÃO

O trabalho caracterizou o processo de temperagem, enfatizando a importância de operar o processo com os parâmetros adequados para que se atinja a forma polimórfica correta da manteiga de cacau e, conseqüentemente, um produto com as características de qualidade desejadas. A partir disso, os parâmetros operacionais envolvidos no processo foram coletados para três classes de massa (branca, ao leite e amarga) e as amostras utilizadas foram analisadas no termômetro digital. Obtiveram-se resultados dentro do padrão (chocolate bem temperado) para todas as amostras.

A obtenção de todas as curvas de têmpera dentro do padrão possibilitou a realização da Análise de Componentes Principais para todos os dados coletados. A ACP apresentou resultados satisfatórios. A partir dos resultados da análise, torna-se possível afirmar que a classificação de uma amostra desconhecida de massa de chocolate pode ser feita com base nos parâmetros operacionais do processo de temperagem industrial convencional. Em outras palavras, as classes de massa branca, ao leite e amarga são discriminadas pelas temperaturas da temperadeira (entrada de massa, água de resfriamento, têmpera, água reaquecimento e saída de massa) e temperaturas de aquecimento dos moldes, do tanque de serviço e da tubulação, que fazem parte do controle de têmpera no geral, afirmando a importância dessa etapa na manufatura do chocolate.

Por meio da ACP, determina-se a classificação da massa, identifica-se quais parâmetros possuem mais influência para cada massa e, conseqüentemente, delimita-se as características comportamentais da classe pela concentração dos scores plotados no gráfico e o estudo da influência das variáveis originais. Esse resultado traz a possibilidade de realização de outros tipos de análises estatísticas com os dados, tais como a de um modelo preditivo, a fim de estimar um parâmetro específico ou até definir um plano de ação específico visando agilizar e encontrar a solução de determinado problema na linha de produção.

## REFERÊNCIAS

ABICAB. *Indústria do chocolate se fortalece e mira na retomada do setor*. 2021. Disponível em: <<https://www.mercadodocacau.com.br/artigo/industria-do->

- chocolate-se-fortalece-e-mira-na-retomada-do-setor>. Acesso em: 21 set. 2021.
- AUGUSTO, P. P. C. 2017. *Impacto sensorial de três diferentes tempos de conchagem sobre chocolates brancos adicionados de açaí liofilizado e seco por atomização*. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/296898593.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2021.
- BECKETT, S. T. *The science of chocolate*: 2nd edition. London, Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry. 2008.
- BEEBE, K. R.; PELL, R. J.; SESASHOLTZ, M. B. *Chemometrics: a practical guide*. New York: Wiley, 1998. 348p.
- BRAGA, L. *Análise de componentes principais para dados composicionais*. Terra. 2019. Disponível em: <<https://geokrigagem.com.br/analise-de-componentes-principais-dados-composicionais/>>. Acesso em: 20 de set. de 2021.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Brasil quer ganhar posições na produção mundial de cacau e chocolate*. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-quer-retomar-protagonismo-no-cenario-global-de-cacau-e-chocolate>>. Acesso em: 20 de set. de 2021.
- BUTTON, S. T. *A toll for wire drawing tribology study*, EUA, 2001.
- CONFECTIONERY MACHINERY - PLANTS & ENGINEERING. [S/A]. *Tempering machines*. Disponível em: <<http://www.kurtmakina.com/newtemperingmachines.html>>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- FERREIRA et al. Processo de temperagem da manteiga de Cacau: análises, conceitos e sinergias em uma multinacional. Curitiba: Brazilian Journal of Business, v.1, n. 3, p. 1207-1217. 2019.
- FERREIRA, M. M. C. *Multivariate QSAR*. J. Braz. Chem. Soc., São Paulo: v.13, n.6, p.742-753, 2002.
- GIL, A.C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1991.
- GODINHO, M. *Classificação de refrigerantes através de análise de imagens e análise de componentes principais (PCA)*. Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás, Goiás: 2007
- GREPIONI, F. *Themed issue: polymorphism and crystal forms*. New J. Chem. 32, p. 1657–1658, 2008.
- GRUNENVALDT, F. *Avaliação de propriedades físicas e sensoriais e do desempenho tecnológico de chocolates produzidos com misturas de manteiga de cacau e gorduras low / zero trans*. 2009. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/267125/1/Grunenvaldt\\_FernandaLourdes\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/267125/1/Grunenvaldt_FernandaLourdes_M.pdf)>. Acesso em: 24 mar. 2021.
- HARTEL, R. W. et al. *Confectionery science and technology*. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.
- HONGYU, K; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J.O. *Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação*. E&S Engineering and Science, v.5, n.1. 2016.
- INCAPER. *Espírito Santo já conta com 25 marcas de chocolate*. 2020. Disponível em: <<https://incaper.es.gov.br/>>. Acesso em: 21 set. 2021.
- LIGEZA, E. O. et al. *A comparative study of thermal and textural properties of milk, white and dark chocolates*. Thermochemica Acta, 2018.
- LINDECRANTZ, A. *Investigation of seedpowder technology for precrystallization processing of dark chocolate - Effect on fat crystal structure and storage stability*. 2014. Disponível em: <<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/208864/208864.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- LIPP, M., ANKLAM, E. *Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate*. Part A. Compositional data. Food chemistry. 1998.
- MASKARA, V. *Principal component analysis in MATLAB*. 2020. Disponível em: <<https://medium.com/analytics-vidhya/principal-component-analysis-in-matlab-f5c27b76e8c>>. Acesso em: 28 set. 2021.
- MÖCKLI, C. *Cristallization of cocoabutter*. 2016. Disponível em: <<http://www.carlomockli.com/2016/01/crystallization-of-cocoabutter.html>>. Acesso em: 19 set. 2021.
- OLIVEIRA, F. P. *Determinação de propriedades físicas de chocolates enriquecidos com farinha de Yacon*. 79f. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos), Univer-



- cidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, PR, 2016.
- ONELLI, R. R. V. *Influência da torra na qualidade de chocolates desenvolvidos com diferentes concentrações de massa de cacau*. 2021. Disponível em: <<http://www2.uesb.br/ppg/ppgecal/wp-content/uploads/2021/04/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Mestrado-Rebeca.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2021.
- PASQUINI, C. *Near infrared spectroscopy: fundamentals practical aspects and analytical applications*. J. Braz. Chem. Soc., São Paulo, v.14, n.2, p.138-219, 2003.
- PIROUZIAN, H. R. et al. *Pre-crystallization process in chocolate: Mechanism, importance and novel aspects*. Food Chemistry, 2020.
- REBELO, R. M. S. *A manteiga de cacau e a gordura do leite na indústria do chocolate – Estudo de cinéticas de cristalização*. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.
- RODRIGUES, M. I., IEMMA, F. A. Noções sobre experimentos fatoriais, comparação do uso das metodologias, estratégia experimental para fatoriais fracionados e delineamento composto central rotacional (DCCR). *Planejamento de experimentos e otimização de processos*. 2. ed. Campinas, SP: Cárita, v.1. 2009.
- SEGUINE, E. *Tempering - The inside story*. 1991. Disponível em:<[https://www.researchgate.net/publication/284632635\\_Tempering\\_-\\_The\\_inside\\_story](https://www.researchgate.net/publication/284632635_Tempering_-_The_inside_story)>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- SILVA, A. R. A. *Caracterização de amêndoas e chocolate de variedades de cacau visando a melhoria da qualidade tecnológica*. 2013 Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/255417/1/Silva\\_AdrianaReisdeAndrade\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/255417/1/Silva_AdrianaReisdeAndrade_M.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2021.
- SILVA, C. F. J. 2018. *Polimorfismo, estrutura e capacidade de formação de cristais plásticos de dióis globulares*. 2018. Disponível em:< [https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/86562/1/Tese\\_Joana%20Silva\\_MQ.pdf](https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/86562/1/Tese_Joana%20Silva_MQ.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2021.
- SLETTENGREN, K. *Crack formation in chocolate pralines master of science thesis in the paster degree programme biotechnology*. Chalmers University of Technology. 2010.
- UNESCO. *Estudo de competitividade do cacau e chocolate no Brasil: Desafios na Produção e Comércio Global*. Disponível em: <<http://www.unesco.org/>>. Acesso em: 21 set. 2021.
- VARELLA, C. A. A. *Análise de componentes principais*. Tese (Pós-Graduação em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, p. 12. 2008.
- ZALLEN, R. *The physics of amorphous solids*. W L Y-V H Verlag, 1983.