

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ALIMENTOS**

PAMELA ANDREANI

**MEDIDAS SIMULTÂNEAS MECÂNICAS E ACÚSTICAS E
CORRELAÇÕES SENSORIAIS PARA ALIMENTOS
CROCANTES**

FLORIANÓPOLIS

2018

Pamela Andreani

**MEDIDAS SIMULTÂNEAS MECÂNICAS E ACÚSTICAS E
CORRELAÇÕES SENSORIAIS PARA ALIMENTOS
CROCANTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi

Coorientador: Prof. Dr. Giustino Tribuzi
Dr(a) Jaqueline Oliveira de Moraes

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Andreani, Pamela

Medidas Simultâneas Mecânicas e Acústicas e Correlações Sensoriais para Alimentos Crocantes / Pamela Andreani ; orientador, Bruno Augusto Mattar Carciofi ; coorientador, Giustino Tribuzi, coorientadora, Jaqueline Oliveira de Moraes, 2018.

197 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Crocância. 3. Análise sensorial. 4. Propriedades acústicas. 5. Propriedades Mecânicas. I. Carciofi, Bruno Augusto Mattar. II. Tribuzi, Giustino. III. de Moraes, Jaqueline Oliveira. IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

**MEDIDAS SIMULTÂNEAS MECÂNICAS E ACÚSTICAS E
CORRELAÇÕES SENSORIAIS PARA ALIMENTOS
CROCANTES**

Por

Pamela Andreani

Dissertação julgada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Alimentos**, área de concentração: **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Bruno Augusto Mattar Carciofi
Orientador

Dr^a. Jaqueline Oliveira Moraes
Coorientadora

Prof. Dr. Giustino Tribuzi
Coorientador

Bruno Augusto Mattar Carciofi
Orientador

Banca Examinadora

Bruno Augusto Mattar Carciofi

Prof^a. Dr^a. Bárbara Pociuncula

Prof. Dr. João Borges Laurindo

Florianópolis, 26 de fevereiro de 2018.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo amor, incentivo e paciência.

Ao meu noivo Lucas, pelo apoio e compreensão, entendendo que a minha dedicação era importante e se mantendo ao meu lado sempre.

Ao Prof. Bruno Augusto Mattar Carciofi por ter aceito novamente me orientar, mesmo sabendo das minhas limitações de tempo. Para mim você é um exemplo de profissionalismo e dedicação.

À minha coorientadora Jaqueline, você foi muito mais que uma coorientadora, me ajudando nos experimentos, tirando minhas dúvidas e me incentivando sempre, enfim, faltam palavras para te agradecer. Obrigada por ter confiado a mim este projeto!

Ao meu coorientador Prof. Giustino pelas palavras de incentivo, auxílio na parte estatística e ótimas sugestões durante as correções.

Aos colegas do PROFI, Ricardo, Denise, Gabriela, Aline, Milena, e Raquel pela prestatividade. Em especial ao Jade, pelo apoio nas etapas iniciais deste projeto e durante os experimentos de secagem.

À aluna de iniciação científica Renata, obrigada pela ajuda e persistência na realização dos experimentos.

Aos avaliadores sensoriais que disponibilizaram seu tempo, o meu muito obrigada. Vocês foram parte fundamental deste trabalho!

Ao Prof. Stephan e ao Bernardo do LVA pelo projeto de construção do aparato experimental e por disponibilizarem todas as ferramentas para obtenção e tratamento dos dados acústicos. Meu muito obrigada em especial ao Bernardo, que inúmeras vezes tirou minhas dúvidas e me auxiliou no tratamento de dados, sempre com muita prestatividade e bom humor.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos por todo o conhecimento transmitido.

À banca examinadora pela disponibilidade e sugestões.

À Amoratto Sorvetes Artesanais, em especial à Rejane Zanotta por ter me liberado para assistir às aulas e realizar os experimentos sempre que necessário.

À minha prima Nadine, que teve todo o trabalho de procurar e trazer dos EUA os padrões da escala de crocância.

RESUMO

A indústria alimentícia está cada vez mais interessada em utilizar métodos mais rápidos e efetivos do que a análise sensorial na determinação da crocância de alimentos. Medidas instrumentais, acústicas e mecânicas, vêm sendo estudadas na tentativa de correlacionar estes resultados com a crocância sensorial determinada por painéis treinados. No entanto, as baixas taxas de aquisição destes parâmetros resultam, muitas vezes, em baixas correlações com a resposta sensorial. Neste estudo um sistema de medição acústico (com alta taxa de aquisição de dados) foi acoplado a um texturômetro para possibilitar as medidas acústicas durante a fratura de produtos crocantes. O texturômetro e o microfone foram inseridos em uma caixa semi-anecoica para evitar a influência dos ruídos externos durante as medições. Testes com diferentes posições do microfone em relação à sonda mecânica foram realizados. Dois tipos de filtros acústicos (*Finite Impulse Response* e Arimi) foram aplicados no pós-processamento dos dados para atenuar o ruído produzido pelo texturômetro. Um painel sensorial foi treinado com base nos produtos que compõem a escala *Spectrum* de crocância. Três estudos de determinação de crocância por análises acústicas, mecânicas e sensoriais foram realizados. O primeiro estudo foi realizado com produtos da escala *Spectrum*. O segundo estudo foi realizado com bananas desidratadas pelo método *Conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes parâmetros de processo. Por fim, o terceiro estudo foi realizado com bananas desidratadas por diferentes processos de secagem. A caixa semi-anecoica foi efetiva na atenuação dos ruídos externos, produzindo um isolamento de 20 dB de SPL em frequências acima de 1 kHz. O microfone foi posicionado a 5 cm de distância e com um ângulo de 45 ° em relação à sonda mecânica. O ruído provocado pelo texturômetro foi atenuado em cerca de 30 dB com a utilização de filtros acústicos. Para a avaliação da crocância dos produtos da escala *Spectrum*, em ensaios de compressão, foram encontradas correlações acima de 0,7 entre a crocância sensorial e as variáveis número de picos de força, número de picos acústicos e SPL_{eq} . No entanto, as medições simultâneas não foram capazes de detectar diferenças entre os produtos com crocâncias intermediárias da escala sensorial. Resultados encontrados para as bananas desidratadas por KMFD utilizando diferentes parâmetros de processo, indicaram que a secagem à temperatura de 70 °C com aplicação de um pulso de vácuo produziu a banana mais crocante. No entanto, nenhum dos parâmetros avaliados conseguiu detectar diferenças entre todas as amostras. Para as bananas secas por diferentes processos foram encontradas fortes

correlações entre a crocância sensorial e as variáveis: número de picos acústicos ($r = 0,796$), número de picos de força ($r = 0,723$), porosidade ($r = 0,797$) e SPL_{eq} ($r = 0,700$) em testes de perfuração utilizando o filtro Arimi. A secagem por KMFD resultou na amostra de banana mais crocante. O tipo de filtro utilizado no pós-processamento dos dados acústicos influenciou muito pouco nas correlações obtidas entre as variáveis, sendo apenas relevante no estudo utilizando diferentes processos de secagem, onde o filtro Arimi detectou melhor as diferenças entre as amostras. Nos demais estudos ambos os filtros podem ser utilizados. As amostras de bananas mais crocantes foram também as preferidas nos testes de aceitação com consumidores.

Palavras-chave: crocância, propriedades acústicas, propriedades mecânicas, escala sensorial

ABSTRACT

Food industry is very interested in using faster and more effective methods than sensory analysis to assess the food crispness. Acoustical and mechanical measurements have been studied in an attempt to correlate the results with sensory crispness determined by trained panels. However, the low sampling rates for these parameters result in low correlations with sensory answer. In this study, a high sampling rate acoustic measurement system was connected to texturometer to perform acoustical measurements during crispness products fractures. The texturometer and the microphone were placed inside the semi-anechoic box to avoid an influence of background noise during measurements. Tests with different microphone positions in relation to the mechanical probe were performed. Two acoustic filters (Finite Impulse Response and Arimi) were applied in the post-processing of the acoustic data to mitigate the texturometer's noise. A sensory panel was trained using the products of *Spectrum* crispness scale. Three studies to assess crispness by acoustical, mechanical and sensorial analysis were performed. The first study was performed with products of the *Spectrum* crispness scale. The second study was performed with bananas dehydrated by conductive multi-flash drying (KMFD), using different process parameters. Finally, the third study was performed with bananas dehydrated by different drying process. The semi-anechoic box was effective to mitigate the background noise, the sound insertion loss was above 20 dB in frequencies greater than 1 kHz. The microphone was positioned at 5 cm distance and with an angle of 45° to the mechanical probe. The texturometer's noise was attenuated around 30 dB with the use of acoustic filters. In the crispness evaluation for products of *Spectrum* scale were founded correlations above 0,7 among sensory crispness and the variables: number of the force peaks, number of acoustic peaks and SPL_{eq} , in the compression tests. Nevertheless, the simultaneous measurements were not able to detect differences between products of sensory scale with intermediate crispness. The results of bananas dehydrated by KMFD, using different process parameters, suggest that drying at 70 °C with the application of one vacuum pulse produced the crispier banana. However, none of the investigated parameters detected differences between all samples. Bananas dehydrated by different drying process indicated strong correlations between sensory crispness and the variables: number of acoustic peaks ($r = 0,796$), number of force peaks ($r = 0,723$), porosity ($r = 0,797$) and SPL_{eq} ($r = 0,700$), in the penetration tests using Arimi filter. The KMFD process produced the crispier banana. The type of filter used

in the post-processing of acoustic data had little influence in the correlations obtained between the variables. The type of filter was only relevant in the study using different drying process, in which the Arimi filter was more effective to detect differences between samples. In the other studies both filters can be used. The crispier banana samples were also preferred in the consumer acceptance test.

Keywords: crispness, acoustic properties, mechanical properties, sensory scale

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora produzidos por algumas fontes de ruído.....	44
Figura 2: Magnitude de resposta de filtros ideais (a) <i>low-pass</i> (passa-baixa) (b) <i>high-pass</i> (passa-alta) (c) <i>bandpass</i> (passa-banda) e (d) <i>bandstop</i> (corta-banda).....	46
Figura 3: Ilustração do princípio do PCA	52
Figura 4: Curvas típicas de secagem	55
Figura 5: Visão esquemática da caixa acústica construída.....	64
Figura 6: Câmara com isolamento acústico construída para as medições de som realizadas durante a fratura dos produtos.....	64
Figura 7: Escala de maturação de bananas tipo prata.....	66
Figura 8: Dispositivo experimental utilizado para a secagem por KMFD	67
Figura 9: Posições do microfone em relação à <i>probe</i> mecânica. a) Posição 1, b) Posição 2, c) Posição 3, d) Posição 4, e) Posição 5, f) Posição 6, g) Posição 7.....	69
Figura 10: Ruído de fundo medido com a porta da câmara semi-anecoica aberta e fechada.....	70
Figura 11: Comparação entre espectrogramas gerados a partir de (a) dados originais e (b) filtrados (filtro Arimi) para o ruído de fundo do texturômetro. NFFT: 2048, <i>overlap</i> 50%, <i>Hanning window</i>	71
Figura 12: Espectrogramas gerados pela quebra da banana desidratada. Posições do microfone de 1 a 7. NFFT: 4096, <i>overlap</i> 50%, <i>Hanning window</i>	73
Figura 13: Espectrogramas gerados pela quebra da torrada. Posições do microfone de 1 a 7. NFFT: 4096, <i>overlap</i> 50%, <i>Hanning window</i>	75
Figura 14: Fluxograma contendo as etapas de seleção e treinamento do painel descritivo	81
Figura 15: Configurações dos filtros FIR e Arimi.....	87
Figura 16: Curvas força <i>versus</i> tempo e SPL <i>versus</i> tempo durante a compressão da (a) Barra de Granola, (b) Cereal de Aveia e (c) Torrada e durante a perfuração (d) Barra de Granola, (e) Cereal de Aveia e (f) Torrada.....	94
Figura 17: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Teste de compressão, filtro acústico FIR98	
Figura 18: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Teste de compressão, filtro acústico Arimi	103
Figura 19: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Teste de perfuração, filtro acústico FIR	107

Figura 20: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Teste de perfuração, filtro acústico Arimi	112
Figura 21: Resumo das condições de processo utilizadas durante os experimentos de secagem por KMFD	117
Figura 22: Diagrama esquemático do picnômetro a gás	118
Figura 23: Gráficos típicos mostrando a força <i>versus</i> tempo e SPL <i>versus</i> tempo durante a perfuração das bananas desidratadas pelo método KMFD utilizando diferentes condições de processo (a) 60 °C – 1 pulso, (b) 60 °C – 4 pulsos, (c) 70 °C – 1 pulso, (d) 70 °C – 4 pulsos e amostras (e) vácuo - controle	124
Figura 24: Imagens do estereoscópio óptico das bananas desidratadas pelo método KMFD utilizando diferentes condições de processo (a) 60 °C – 1 pulso, (b) 60 °C – 4 pulsos, (c) 70 °C – 1 pulso, (d) 70 °C – 4 pulsos e (e) amostra controle. Todas as figuras foram aplicadas 20 vezes	125
Figura 25: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Filtro acústico FIR	129
Figura 26: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Filtro acústico Arimi	134
Figura 27: Fluxograma de secagem das bananas por diferentes processos e caracterização das amostras	139
Figura 28: Número de picos acústicos <i>versus</i> SPL para (a) Teste de Perfuração e (b) Teste de Compressão	142
Figura 29: Gráficos típicos mostrando a força <i>versus</i> tempo e SPL <i>versus</i> tempo durante a perfuração das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem (a) Secagem Convectiva, (b) Secagem a vácuo, (c) Liofilização e (d) KMFD	149
Figura 30: Imagens do estereoscópio óptico das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem (a) Secagem Convectiva, (b) Secagem a vácuo, (c) Liofilização e (d) KMFD todas com ampliação de 15 vezes.....	149
Figura 31: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Ensaio de Perfuração - Filtro acústico FIR	153
Figura 32: <i>Biplot</i> PC1 e PC2. Ensaio de Perfuração – Filtro acústico Arimi	158

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos encontrados na literatura sobre correlações de medidas na determinação da crocância de alimentos	30
Tabela 2: Escala <i>Spectrum</i> de intensidade de crocância.....	80
Tabela 3: Alimentos selecionados da escala de dureza para o teste de ordenação	83
Tabela 4: Soluções salinas saturadas utilizadas no acondicionamento de bananas desidratadas e torradas comerciais	85
Tabela 5: Escala de intensidade de crocância construída pelos painelistas	88
Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas dos padrões de crocância da escala <i>Spectrum</i>	91
Tabela 7: Parâmetros acústicos para os padrões da escala <i>Spectrum</i> utilizando os filtros FIR e Arimi	92
Tabela 8: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala <i>Spectrum</i> para ensaios mecânicos de compressão utilizando o filtro acústico FIR	95
Tabela 9: Interpretação dos fatores para o teste de compressão – filtro acústico FIR	96
Tabela 10: Análise de componentes principais para o teste de compressão utilizando o filtro acústico FIR.....	97
Tabela 11: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala <i>Spectrum</i> para ensaios mecânicos de compressão utilizando o filtro acústico Arimi	100
Tabela 12: Interpretação dos fatores para o teste de compressão – filtro acústico Arimi	101
Tabela 13: Análise de componentes principais para o teste de compressão utilizando o filtro acústico Arimi.....	102
Tabela 14: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala <i>Spectrum</i> para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico FIR	104
Tabela 15: Interpretação dos fatores para o teste de perfuração – filtro acústico FIR	105
Tabela 16: Análise de componentes principais para o teste de perfuração utilizando o filtro acústico FIR.....	106
Tabela 17: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala <i>Spectrum</i> para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico Arimi	109

Tabela 18: Interpretação dos fatores para o teste de perfuração – filtro acústico Arimi	110
Tabela 19: Análise de componentes principais para o teste de perfuração usando o filtro acústico Arimi	111
Tabela 20: Propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais das bananas desidratadas pelo método KMFD com diferentes condições de processo e pelo método de secagem a vácuo	121
Tabela 21: Contraste das diferenças entre os totais de ordenação das amostras de bananas desidratadas por diferentes processos de secagem	122
Tabela 22: Matriz de correlação de Pearson para bananas desidratadas por diferentes condições de processo - Filtro acústico FIR	126
Tabela 23: Interpretação dos fatores para o teste de penetração – filtro acústico FIR	127
Tabela 24: Análise de componentes principais para o teste de perfuração - filtro acústico FIR	128
Tabela 25: Matriz de correlação de Pearson para bananas desidratadas por diferentes condições de processo - Filtro acústico Arimi	131
Tabela 26: Interpretação técnica dos fatores para o teste de perfuração - filtro acústico Arimi	132
Tabela 27: Análise de componentes principais para o teste de perfuração – filtro acústico Arimi	133
Tabela 28: Propriedades físicas, mecânicas e sensoriais das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem	145
Tabela 29: Propriedades acústicas das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem utilizando os filtros FIR e Arimi	146
Tabela 30: Contraste das diferenças entre os totais de ordenação das amostras de bananas desidratadas por diferentes processos de secagem	147
Tabela 31: Matriz de correlação de Pearson para bananas desidratadas por diferentes processos (Teste de Perfuração - Filtro acústico FIR) .	150
Tabela 32: Interpretação dos fatores para o teste de perfuração - filtro acústico FIR	151
Tabela 33: Análise de componentes principais para o teste de perfuração – filtro acústico FIR	152
Tabela 34: Matriz de correlação de Pearson para bananas desidratadas por diferentes processo (Teste de Perfuração - Filtro acústico Arimi)	155
Tabela 35: Interpretação dos fatores para o tese de perfuração - filtro acústico Arimi	156
Tabela 36: Análise de componentes principais para o teste de perfuração – filtro acústico Arimi	157

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AED – *Acoustic Envelope Detector*

ANOVA – Análise de variância

AOAC – *Association of Official Analytical Chemists*

CMFD – *Convective multi-flash drying*

dB – decibel

Hz – Hertz

FAOSTAT – Divisão de estatística da *Food and Agriculture Organization*

KMFD – *Conductive multi-flash drying*

ε – Porosidade

FIR – *Finite Impulse Response*

I_{ef} – intensidade sonora eficaz

I_0 – intensidade sonora eficaz de referência

IIR – *Infinite Impulse Response*

NIS – Nível de Intensidade Sonora

NPS – Nível de Pressão Sonora

P_{ef} – pressão sonora eficaz

P_0 – pressão sonora eficaz de referência

\hat{p}_1 – vetor unitário

PC – Componente Principal (*Principal Component*)

PCA – Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis*)

SIL – *Sound Intensity Level*

SPL – Nível de Pressão Sonora (*Sound Pressure Level*)

SPL_{eq} – Nível médio de pressão sonora

$SPL_{MÁX}$ – Nível máximo de pressão sonora

$SPL_{MÁX,10}$ – Nível de pressão sonora equivalente dos 10 maiores picos sonoros

V_{ap} – volume aparente

V_t – volume real

\bar{x} – média

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	OBJETIVOS.....	29
1.1.1	Objetivo Geral.....	29
1.1.2	Objetivos Específicos.....	29
1.2	ESTADO DA ARTE.....	30
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	Textura	37
2.2	Avaliação de Textura por Análise Sensorial.....	38
2.3	Avaliação de Textura por Métodos Instrumentais	41
2.3.1	Métodos Mecânicos	41
2.3.2	Métodos Acústicos.....	42
2.3.2.1	Propriedades Acústicas.....	43
2.3.3	Métodos Instrumentais Combinados	47
2.4	Avaliação de Textura por Correlação de Análise Sensorial e Métodos Instrumentais.....	48
2.5	Análise Estatística Multivariada.....	49
2.5.1	Análise Fatorial	49
2.5.1.1	Análise de Componentes Principais (PCA)	51
2.6	Banana.....	53
2.7	Secagem	54
2.7.1	Secagem Convectiva	54
2.7.2	Liofilização	56
2.7.3	Secagem a Vácuo	57
2.7.4	Explosão ou <i>Puffing Drying</i>	57
2.8	Texturização de Produtos a Partir da Secagem.....	58
3.	DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE APARATO PARA OBTENÇÃO DE MEDIDAS SIMULTÂNEAS MECÂNICAS E ACÚSTICAS DE ALIMENTOS CROCANTES.....	61
3.1	Introdução	61
3.2	Material e Métodos.....	63
3.2.1	Construção da caixa acústica.....	63
3.2.2	Determinação do ruído de fundo e aplicação de filtros digitais	64
3.2.3	Matéria-prima.....	65

3.2.4	Secagem por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD)	66
3.2.5	Acondicionamento das amostras	67
3.2.6	Validação do sistema/equipamento para medidas simultâneas acústicas e mecânicas	68
3.2.6.1	Testes mecânicos	68
3.2.6.2	Medidas acústicas.....	68
3.2.6.3	Determinação da posição do microfone	68
3.2.7	Análise espectral	69
3.3	Resultados e Discussões.....	70
3.3.1	Determinação do ruído de fundo e aplicação de filtros digitais 70	
3.3.2	Determinação da posição do microfone	71
3.4	Conclusões Parciais.....	77
4.	AVALIAÇÃO SIMULTÂNEA DE MEDIDAS ACÚSTICAS, MECÂNICAS E SENSORIAIS NA DETERMINAÇÃO DA CROCÂNCIA DOS PADRÕES DA ESCALA <i>SPECTRUM</i>.....	79
4.1	Introdução	79
4.2	Material e Métodos	80
4.2.1	Matéria-prima	80
4.2.2	Determinação da umidade.....	80
4.2.3	Atividade de água	80
4.2.4	Treinamento sensorial	81
4.2.4.1	Recrutamento e triagem dos candidatos	82
4.2.4.1.1	Apresentação do trabalho e seleção dos julgadores	82
4.2.4.1.2	Teste de triagem para análise descritiva	82
4.2.4.1.3	Desenvolvimento da terminologia e introdução à escala descritiva	83
4.2.4.1.4	Prática inicial.....	83
4.2.4.1.5	Construção da escala não estruturada	84
4.2.4.1.6	Identificação de pequenas diferenças de crocância entre produtos	84
4.2.4.1.7	Prática final	84
4.2.5	Medidas acústicas e mecânicas	85

4.2.6	Análise estatística.....	87
4.3	Resultados e Discussão	87
4.3.1	Análise sensorial	87
4.3.2	Análise das propriedades físicas, mecânicas e acústicas	88
4.3.3	Análises das curvas de força <i>versus</i> tempo e SPL <i>versus</i> tempo 93	
4.3.4	Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de compressão utilizando o filtro FIR 95	
4.3.5	Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de compressão utilizando o filtro acústico Arimi.....	100
4.3.6	Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro FIR 104	
4.3.7	Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro Arimi	109
4.4	Conclusões Parciais	112
5. MEDIDAS ACÚSTICAS, MECÂNICAS E SENSORIAIS DE BANANAS DESIDRATADAS PELO MÉTODO KMFD COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PROCESSO		115
5.1	Introdução	115
5.2	Material e Métodos.....	116
5.2.1	Matéria-prima.....	116
5.2.2	Secagem da banana	116
5.2.3	Caracterização das amostras.....	117
5.2.3.1	Determinação da umidade	117
5.2.3.2	Atividade de água	117
5.2.3.3	Porosidade	117
5.2.3.4	Imagens da estrutura interna	118
5.2.3.5	Espessura	118
5.2.4	Determinação das propriedades acústicas e mecânicas	119
5.2.5	Determinação das propriedades sensoriais	119

5.2.6	Análise estatística.....	119
5.3	Resultados e Discussões.....	119
5.3.1	Análise das propriedades físicas, mecânicas e acústicas	120
5.3.2	Análise das propriedades sensoriais	122
5.3.3	Análises das curvas de força <i>versus</i> tempo e SPL <i>versus</i> tempo combinadas à análise da estrutura do produto	122
5.3.4	Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro FIR	126
5.3.5	Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro Arimi	131
5.4	Conclusões Parciais.....	134
6.	MEDIDAS ACÚSTICAS, MECÂNICAS E SENSORIAIS DE BANANAS DESIDRATADAS POR DIFERENTES PROCESSOS DE SECAGEM.....	137
6.1	Introdução	137
6.2	Material e Métodos	138
6.2.1	Matéria-prima	138
6.2.2	Experimentos de secagem e caracterização das amostras	138
6.2.3	Propriedades acústicas e mecânicas	139
6.2.4	Determinação das propriedades sensoriais.....	140
6.2.5	Análise estatística.....	141
6.3	Resultados e Discussões.....	141
6.3.1	Determinação da velocidade para cada <i>probe</i>	141
6.3.2	Análise das propriedades físicas, mecânicas e acústicas	143
6.3.3	Análise das Propriedades Sensoriais	147
6.3.4	Análises das curvas de força <i>versus</i> tempo e SPL <i>versus</i> tempo combinadas à análise estrutura do produto	147
6.4	Conclusões Parciais.....	159
7.	CONCLUSÕES	161
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	163
	REFERÊNCIA.....	165
	APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO DE PRÉ-SELEÇÃO	183

APÊNDICE B - QUESTIONÁRIO DE TEXTURA	185
APÊNDICE C - FICHA DE AVALIAÇÃO DE CROCÂNCIA	187
APÊNDICE D – FICHA PARA O TESTE DE PREFERÊNCIA	189
APÊNDICE E – GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> TEMPO E SPL <i>VERSUS</i> TEMPO PARA OS PADRÕES DA ESCALA <i>SPECTRUM</i>	191
APÊNDICE F – GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> TEMPO E SPL <i>VERSUS</i> TEMPO PARA BANANAS DESIDRATADAS POR KMFD UTILIZANDO DIFERENTES CONDIÇÕES DE PROCESSOS	193
APÊNDICE G – GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> TEMPO E SPL <i>VERSUS</i> TEMPO PARA BANANAS DESIDRATADAS POR DIFERENTES PROCESSOS	195
ANEXO A – FICHA PARA TRIAGEM DO PAINEL DESCRITIVO	197

DIAGRAMA CONCEITUAL

MEDIDAS SIMULTÂNEAS MECÂNICAS E ACÚSTICAS E CORRELAÇÕES SENSORIAIS PARA ALIMENTOS CROCANTES

Motivação

- O treinamento de um painel sensorial para a avaliação de crocância tem custo elevado e longos tempos de execução
- Medições mecânicas e acústicas conjuntas apresentam maior praticidade e rapidez na obtenção dos resultados, características importantes para a indústria de alimentos

O que já foi feito?

- Tentativas de correlacionar a textura dos alimentos por análise sensorial em conjunto com medições mecânicas e acústicas ainda têm sido pouco exploradas
- A maioria dos trabalhos existentes utiliza a solução comercial AED, acoplada a um analisador de textura, para realizar as análises simultâneas, no entanto, a taxa de aquisição de dados disponível é muito baixa (0,5 kHz) e o equipamento tem custo elevado

Hipóteses

- É possível correlacionar a crocância sensorial com parâmetros acústicos e mecânicos
- Boas correlações acústicas e sensoriais são obtidas quando se utilizam taxas de aquisição de dados acústicos compatíveis com a audição humana

Metodologia Experimental

- Construção de uma câmara semi-anecoica para a realização das medidas simultâneas acústicas e mecânicas
- Determinação da posição do microfone
- Aplicação de filtros acústicos
- Treinamento de um painel sensorial e avaliações sensoriais
- Testes mecânicos
- Caracterização física dos produtos

Respostas

- Características físicas gerais dos produtos testados
- Propriedades mecânicas e acústicas
- Resposta sensorial em termos de valor na escala de crocância
- Correlações dos dados por meio da realização da análise de componentes principais e matriz de correlação

1. INTRODUÇÃO

A textura e a reologia são, assim como o sabor e o *flavour*, critérios cruciais na aceitação ou rejeição de um alimento (LAWLESS; HEYMANN, 1998; SCOTT; DOWNEY, 2007). Uma das mais utilizadas definições de textura de alimentos foi dada por Szczesniak e Klein (1963), onde é definida como uma manifestação sensorial da estrutura do alimento e a maneira como a estrutura reage quando uma força é aplicada, os sentidos humanos especificamente envolvidos neste processo são a visão, o cinestésico e a audição. O conhecimento fisiológico dos parâmetros envolvidos no processo de mastigação é, portanto, importante ao realizar e projetar medidas reológicas/instrumentais para um alimento e obter melhores previsões da percepção sensorial. Este tipo de análise pode resultar em economia de tempo e recursos envolvidos no treinamento de painéis sensoriais utilizados durante o desenvolvimento e o controle de qualidade dos produtos. Dentre os métodos sensoriais utilizados como técnica de referência para avaliações sensoriais instrumentais, o método descritivo sensorial tem sido popularmente utilizado por pesquisadores de alimentos desde a década de 1980 (CHEN; ENGELEN, 2012). A crocância é um dos atributos de textura que vem sendo estudado na busca por correlações com a análise sensorial.

Quando um alimento crocante é mastigado, o maxilar desacelera e acelera como resultado da resistência e da quebra das partículas dos alimentos, e um som característico é produzido. O comportamento da ruptura de um alimento e o correspondente som emitido são essenciais para a percepção sensorial (CHEN; ENGELEN, 2012). Todavia, há mais do que simplesmente o som envolvido na crocância, as propriedades mecânicas do alimento sólido, sua macro e microestrutura e a forma como o mesmo é mordido também influenciam na percepção da crocância (VINCENT, 1998).

Drake (1963) foi o primeiro cientista a estudar o som dos alimentos durante a mastigação e desde então muitas tentativas têm sido realizadas para relacionar características sensoriais (especialmente a crocância) com a qualidade dos sons que os alimentos produzem (MARKS, 1974). Vickers e Bourne (1976) propuseram que o vínculo entre as propriedades mecânicas e a percepção da crocância seria o som emitido durante a fratura do alimento. Vários testes mecânicos têm sido utilizados para medir a textura enquanto o som produzido é gravado, flexão (*tree point bending*), compressão e perfuração. Alguns estudos obtiveram correlações boas entre parâmetros sensoriais e acústicos enquanto em outros casos, o som, a textura e os escores sensoriais mostraram fracas

correlações. As medidas instrumentais demonstram que, embora proporcionem uma previsão satisfatória da crocância, ainda são menos discriminativas que um painel sensorial treinado (CHEN; ENGELEN, 2012).

A *Stable Micro System* (Godalming, U.K.) disponibiliza uma solução comercial denominada AED (*Acoustic envelope detector*) que pode ser acoplada ao texturômetro da mesma marca para detectar emissões acústicas durante a fratura dos alimentos, a taxa de aquisição de dados deste equipamento é de 0,5 kHz para o sinal acústico (CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; SAELEAW; SCHLEINING, 2011; SALVADOR et al., 2009; VARELA et al., 2006; TANIWAKI; KOHYAMA, 2012). Algumas pesquisas têm relatado a necessidade de se utilizar taxas de aquisição de dados superiores a 0,5 kHz na busca por melhores correlações com os dados sensoriais (ARIMI et al., 2010; CASTRO-PRADA et al., 2007; PIAZZA; GIGLI, BENEDETTI, 2006).

De acordo com o critério de Nyquist, quando um sinal é amostrado a maior frequência do sinal deve ser de pelo menos metade do valor da taxa de aquisição de dados. Quando este critério não for cumprido, dados serão perdidos e o som de uma determinada frequência será amostrado como sendo de uma frequência mais baixa do que realmente era. Tomando como referência a maior frequência detectável pelo ouvido humano de 20 kHz, a taxa de aquisição de dados acústicos deve ser de pelo menos 40 kHz (CASTRO-PRADA et al., 2007). Devido à baixa taxa de aquisição de dados do AED, muitas vezes não são alcançadas boas correlações entre métodos instrumentais de determinação de crocância e a crocância sensorial.

Produtos crocantes podem ser obtidos naturalmente, como no caso das frutas e vegetais, ou a partir de métodos de secagem. Atualmente, na indústria de alimentos desidratados, existe um grande número de técnicas de secagem que buscam produzir alimentos desidratados com maior porosidade, menor encolhimento e conseqüentemente, mais crocantes (AGUILERA, 2005). A técnica mais comum é a secagem por ar ou convectiva. Nesse método, a redução da umidade do material é obtida aumentando a temperatura, diminuindo a umidade relativa do ar e aumentando a velocidade do fluxo de ar. No entanto, essa técnica em geral causa danos estruturais, sensoriais e nutricionais aos produtos. A secagem com o uso do vácuo utiliza altos gradientes de pressão sendo assim, baixas temperaturas podem ser utilizadas durante o processo o que evita degradações nutricionais e sensoriais do produto processado. Exemplos de secagem a vácuo são: liofilização, secagem a vácuo condutiva,

secagem por micro-ondas a vácuo, entre outros (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

Entre os métodos de secagem, a liofilização é considerada o melhor método de desidratação para produtos sensíveis e com alto valor agregado (OIKONOMOPOULOU; KROKIDA; KARATHANOS, 2011). O estado sólido da água durante a liofilização protege a estrutura primária e a forma dos produtos com mínima redução de volume. Contudo, os custos com o equipamento e o processo e os longos tempos de secagem tornam a liofilização o processo de secagem mais caro (RATTI, 2001). Métodos alternativos que produzam alimentos crocantes e com baixo custo operacional são de grande importância para a indústria de alimentos.

A secagem por KMFD (*conductive multi-flash drying*) é uma técnica alternativa à liofilização, que permite obter produtos com baixo teor de umidade e atividade de água e textura crocante. Além disso, esta técnica de secagem reduz custos e tempos de processo quando comparada à liofilização (PORCIUNCULA; SEGURA; LAURINDO, 2016).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar medições simultâneas mecânicas e acústicas para avaliar a crocância de alimentos e correlacioná-las com medidas sensoriais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver aparato para determinação simultânea mecânica e acústica da crocância.
- Determinar as condições experimentais (uso de câmara semi-anechoica, posição do microfone e filtragem de ruídos) necessárias para a avaliação da crocância em alimentos.
- Selecionar e treinar um painel sensorial quanto ao atributo de crocância.
- Avaliar a crocância de sete produtos padrão da escala de crocância *Spectrum* usando medidas acústicas e mecânicas e relacioná-las com resultados da análise sensorial, para validar o dispositivo experimental desenvolvido.
- Correlacionar medidas sensoriais com medidas instrumentais mecânicas e acústicas para determinar a crocância de bananas desidratadas obtidas i) por KMFD (*Conductive Multi Flash Drying*) utilizando diferentes parâmetros de processo e ii) por diferentes métodos de secagem: ar quente, liofilização, vácuo e KMFD.

1.2 ESTADO DA ARTE

Na Tabela 1 estão listados alguns dos trabalhos encontrados na literatura que utilizam métodos acústicos e/ou mecânicos para determinar a crocância de alimentos ou para correlacionar com a crocância de alimentos determinada sensorialmente. Estão listadas as conclusões mais relevantes dos trabalhos do ponto de vista das correlações entre as medidas realizadas.

Tabela 1 - Trabalhos encontrados na literatura sobre correlações de medidas na determinação da crocância de alimentos

Autor (ano)	Objetivo	Medidas correlacionadas / Método de correlação	Conclusões Principais
Drake (1963)	- Estudar metodologias e variáveis de interesse para relacionar medidas de sons produzidos pelos esmagamento de alimentos com dados sensoriais na determinação da textura de alimentos	Propriedades acústicas (frequência, amplitude e duração do som) durante a mastigação / Avaliações dos gráficos das propriedades acústicas	- Os sons chegam às orelhas por condução óssea durante a mastigação - O procedimento “de boca aberta” não representa necessariamente a real mastigação - Existem diferenças nas mastigações de certos alimentos entre as pessoas
Edmister e Vickers (1985)	- Relacionar o volume e a quantidade de sons produzidos durante a mordida de produtos crocantes para prever a crocância sensorial	Acústica e sensorial / Regressão linear múltipla	- O log do nº de eventos sonoros x amplitude média dos picos sonoros foi o melhor preditor da crocância

	<p>- Comparar medidas sensoriais e instrumentais sonoras de produtos crocantes (secos e úmidos)</p> <p>- Examinar a relação entre a determinação da crocância via oral e auditiva</p>		<p>- Produtos crocantes secos e úmidos não levaram à sensações auditivas diferentes</p> <p>- Nenhuma medida acústica previu bem a crocância oral atribuída pelo painel</p>
<p>Chen, Karlsson e Povey (2005)</p>	<p>Avaliar a aplicabilidade e a confiabilidade das medidas acústicas na avaliação de produtos crocantes</p>	<p>Acústica, mecânica e sensorial / Testes de ordenação de crocância relacionados ao número de eventos acústicos e picos mecânicos</p>	<p>- O uso do AED foi efetivo na determinação da crocância de biscoitos</p> <p>- O número de eventos sonoros mostrou boa correlação com a força de compressão e a segunda derivada da força</p> <p>- Tempo de integração de 1,25 ms foi mais efetivo para discernir a crocância de biscoitos com baixa crocância enquanto o tempo de integração de 0,25 ms foi mais efetivo na avaliação de biscoitos com alta crocância</p> <p>- As propriedades acústicas mostraram boas correlações com as propriedades sensoriais</p>

Chauhier et al. (2005)	Predizer as propriedades sensoriais de flocos de milho comparando medidas mecânicas e acústicas com respostas sensoriais	Acústica, mecânica e sensorial / Análise de variância canônica	<ul style="list-style-type: none"> - As propriedades mecânicas não evidenciaram a mesma tendência que a avaliação sensorial - Os sinais acústicos se mostraram eficientes em discriminar os flocos de uma forma similar à resposta sensorial
Varela et al. (2006)	Avaliar a crocância de amêndoas Marcona com diferentes graus de torrefação, por meio de uma abordagem integrada: medição simultânea de força/deslocamento e som emitido durante a compressão e sua relação com a estrutura, a microestrutura e a avaliação sensorial	Acústica, mecânica, sensorial e microestrutura / PCA (análise de componentes principais)	<ul style="list-style-type: none"> - Altas correlações entre análise sensorial, taxa de emissão acústica, tamanho dos picos acústicos, nº de picos negativos da segunda derivada da curva força-deslocamento e microestrutura foram encontradas - O primeiro componente principal contém parâmetros acústicos e mecânicos
Castro-Prada et al. (2007)	Desenvolver um método capaz de caracterizar em detalhes e ao mesmo tempo as propriedades acústicas e mecânicas de produtos crocantes	Acústica, mecânica e microestrutura / Não se aplica	<ul style="list-style-type: none"> - O método implementado é capaz de realizar medições simultâneas acústicas e mecânicas - Uma análise aprofundada dos dados acústicos e mecânicos requer uma taxa de aquisição de dados superior a 50kHz

			<p>- Deve-se ter atenção quanto aos artefatos nas análises acústicas (ângulo e distância do microfone à amostra, isolamento do motor e da caixa de engrenagens do texturômetro)</p>
<p>Salvador et al. (2009)</p>	<p>Determinar a crocância de seis diferentes batatas chips utilizando medições mecânicas e acústicas e correlacionar com medidas sensoriais.</p>	<p>Acústica, mecânica e sensorial / PCA</p>	<p>- Avaliações mecânicas e acústicas combinadas foram efetivas na determinação da crocância sensorial</p> <p>- A crocância está positivamente relacionada ao nº de picos acústicos e mecânicos, $SPL_{Máx,10}$ (nível de pressão sonora equivalente dos 10 maiores picos sonoros) e área sob a curva</p>
<p>Arimi et al. (2010)</p>	<p>Desenvolver dispositivos e <i>softwares</i> que permitam utilizar altas taxas de aquisição de dados e que possam analisar dados acústicos e mecânicos em altas frequências</p>	<p>Acústica, mecânica e sensorial / Método dos mínimos quadrados</p>	<p>- Foram encontradas altas correlações (acima de 0,7) entre parâmetros acústicos e mecânicos e a crocância sensorial</p> <p>- O sistema acústico proposto oferece altas taxas de aquisição de dados e pode ser acoplado a qualquer texturômetro ou pode ser</p>

				utilizado durante avaliações sensoriais de crocância
Saeleaw e Schleining (2011)	Estudar o efeito da temperatura e do tempo de fritura sobre as características dos biscoitos de mandioca utilizando medidas mecânicas e acústicas.	Acústica e mecânica / Método dos mínimos quadrados	- Foi encontrada uma boa correlação entre número de picos de força e número de picos acústicos ($r^2 = 0,9762$)	
Taniwaki e Kohyama (2012)	Investigar a correlação de propriedades acústicas e sensoriais de batatas chips utilizando um texturômetro	Acústica e mecânica / Coeficientes de correlação	- Boa correlação ($r = 0,686$) foi encontrada entre os parâmetros de força no ponto de maior fratura e a pressão sonora	
Kwak; Chang e Lee (2015)	Estimar a intensidade da crocância e a aceitação de batatas fritas utilizando medições acústicas e mecânicas.	Acústica, mecânica e sensorial / Regressão linear	- As medidas acústicas e mecânicas combinadas se mostraram mais efetivas na determinação da crocância do que as medidas separadas	
Piazza e Giovenzana (2015)	Determinar a crocância em maçãs com medidas simultâneas acústicas e mecânicas	Acústica, mecânica e sensorial / PCA	- As emissões acústicas durante a primeira mordida não foram eficazes na avaliação da crocância de maçãs - Análises mecânicas e acústicas combinadas são mais confiáveis	
Jakubczyk, Gondek e Tryzno (2017)	Estudar dois sistemas acústicos diferentes (um de contato e um sem contato) e avaliar as	Acústica, mecânica e sensorial / PCA	- As medidas acústicas possuem alta correlação com os atributos	

	<p>relações entre os atributos de textura utilizando técnicas sensoriais e instrumentais</p>		<p>sensoriais de textura, com exceção da dureza. - A aplicação das medidas de força-deslocamento combinadas com emissões acústicas pode ser um método efetivo para determinar a textura de cereais extrusados recheados</p>
--	--	--	--

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Textura

A textura de um material é percebida pelos sentidos da visão (textura visual), tato (textura tátil) e audição (textura auditiva), em alguns produtos apenas um desses sentidos é usado para perceber a textura do produto e, em outros casos, a textura é percebida pela combinação destes sentidos. Por exemplo, a textura de uma laranja é avaliada pela rugosidade da pele que é percebida visualmente e pelo toque. Enquanto a textura de uma batata frita na boca é percebida tanto de forma tátil quanto auditiva (VICKERS, 1987b).

Brennan (1980) conceituou textura como um atributo sensorial percebido pelos sentidos do tato, da visão e da audição, assim, o único método direto de medir a textura é por meio de um ou mais destes sentidos. Técnicas sensoriais são mais precisas que os demais métodos de avaliação de textura, como por exemplo, medidas mecânicas.

Entre os atributos sensoriais, a crocância é particularmente importante no controle de qualidade dos alimentos e no desenvolvimento de novos produtos. Crocância pode ser traduzida como *crunchiness* e/ou *crispness*, é um atributo sensorial que surge da reação dos sentidos à desintegração mecânica acompanhada por uma emissão acústica, e é comumente relacionado à qualidade do produto (ÇARŞANBA; DUERRSCHMID; SCHLEINING, 2017). Produtos crocantes devem se romper a uma força baixa com vários eventos de fratura frágil (AL CHAKRA; ALLAF; JEMAI, 1996; LUYTEN; PLIJTER; VAN VLIET, 2004; VINCENT, 1998). O acompanhamento de várias explosões sonoras é também importante para a percepção da crocância (DIJKSTERHUIS et al., 2007; DRAKE, 1963; DUIZER, 2001; LUYTEN; PLIJTER; VAN VLIET, 2004).

Os consumidores, normalmente classificam alimentos crocantes em três categorias: frutas e vegetais crus, alimentos fritos (como bacon e frango) e farináceos (tais como biscoitos, cereais e batata chips) (SZCZESNIAK, 1988). Essa classificação é baseada no teor de umidade, a qual contribui para a percepção da crocância. Frutas e vegetais crus são classificados como *wet crispy* e a crocância está relacionada com a pressão de turgescência resultante da presença de água dentro da matriz celular (VICKERS, 1976). Quando o produto é mordido, a liberação da pressão leva a geração de som. Produtos farináceos são *dry crispy* e contém gás aprisionado em sua estrutura. Os produtos classificados como *dry crispy* são geralmente fabricados e por consequência a sua textura

pode ser controlada pelo processo de fabricação. Portanto, a compreensão da estrutura do produto para caracterizar a textura de produtos crocantes é necessária (KILCAST, 2013).

Métodos utilizados para determinar a crocância são baseados na análise sensorial, testes mecânicos ou na combinação de ambos (ROUDAUT et al., 2002). A análise sensorial fornece uma medida direta da crocância, mas não é conveniente como um teste de rotina, por exemplo, nas indústrias de alimentos (LIU; TAN, 1999). A combinação de longos tempos de execução e alto custo envolvidos nesta análise tem motivado o desenvolvimento de testes instrumentais para a determinação da textura de alimentos (CHEN; OPARA, 2013).

Testes mecânicos baseados na força-deslocamento durante a fratura de materiais têm sido comumente utilizados na avaliação da crocância (ROUDAUT et al., 2002). Todavia, testes de força-deslocamento possuem a limitação de não capturar o som gerado por produtos crocantes durante a fratura, que é um parâmetro importante na avaliação global deste atributo sensorial. Para superar esta limitação testes acústicos podem ser utilizados (DUIZER, 2001).

2.2 Avaliação de Textura por Análise Sensorial

A qualidade de um produto é definida como a adequação ao uso, sendo a qualidade sensorial, intrínseca às conformidades do produto e as suas especificações, que no Brasil, seguem o Padrão de Identidade e Qualidade (PIQ) definidos por legislação. A qualidade sensorial é importante como parâmetro de escolha de um determinado produto, sendo uma importante ferramenta no controle de qualidade de uma empresa. Esta análise pode contribuir na otimização da produção, a fim de atingir a preferência do consumidor (QUEIROZ; TREPTOW, 2006).

Os métodos de avaliação sensorial incluem avaliações humanas a respeito de um produto e podem ser divididos em descritivos, discriminativos e afetivos. Os testes sensoriais descritivos descrevem os componentes ou parâmetros sensoriais e medem a intensidade em que são percebidos. Na análise descritiva o provador também avalia, através de uma escala, o grau de intensidade com que cada atributo está presente. Os testes sensoriais discriminativos ou de diferença são considerados métodos objetivos e medem atributos específicos pela discriminação simples, indicando por comparações, se existem ou não diferenças estatísticas entre amostras. Já nos testes afetivos o julgador expressa seu estado emocional ou reação afetiva ao escolher um produto pelo outro. É a forma usual de se medir a opinião de um grande número de

consumidores com respeito as suas preferências, gostos e opiniões. As escalas mais empregadas são: de intensidade, a hedônica, do ideal e de atitude ou de intenção (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2005).

Alguns dos métodos citados acima necessitam de avaliadores treinados. O recrutamento do painel sensorial é um elemento chave na criação de um painel descritivo de sucesso. O primeiro passo na construção de um painel sensorial é o recrutamento dos avaliadores mais motivados. Eles devem ser informados, em detalhes, sobre o estudo e quais serão os benefícios que irão receber (dinheiro, conhecimento, experiência, etc.) (MEILGAARD; CIVILLE; CARR, 2007). No recrutamento inicia-se o processo de seleção, mediante aplicação de questionários e/ou entrevistas individuais que permitam certo conhecimento dos indivíduos que constituirão a equipe. A partir desse primeiro contato, o analista sensorial passa a ter conhecimento da disponibilidade, condições de saúde, habilidade de verbalização, responsabilidade, entre outras características que um julgador deve possuir, permitindo de antemão, reduzir a população alvo que irá constituir a equipe (QUEIROZ; TREPTOW, 2006). Sendo que um grupo de não menos que 25 pessoas deve passar por uma triagem para se chegar no painel desejado (CIVILLE; SZCZESNIAK, 1973). Segundo Meilgaard, Civile e Carr (2007), após a etapa de triagem inicial os candidatos devem ser capazes de ordenar corretamente uma série de amostras que representem um aumento de intensidade em certo atributo. Na etapa seguinte, uma escala contendo os padrões de referência de intensidade em determinado atributo deve ser introduzida no treinamento. As etapas finais do treinamento consistem em exaustivas horas de treinamento para que o painel ganhe habilidade e confiança. Inicialmente amostras diferentes em determinado atributo são avaliadas, em seguida amostras que representem pequenas diferenças entre a classe de produtos são avaliadas pelo painel. Por fim, amostras que representem a situação real para a qual o painel está sendo treinado são avaliadas.

A extensão do treinamento vai depender da complexidade do atributo avaliado e do tipo de resposta sensorial que se deseja (CHEN; OPARA, 2013). Alguns estudos que tentam correlacionar medidas instrumentais com análise sensorial têm utilizado um painel sensorial pequeno e não treinado. Arimi et al. (2010), Chen, Karlsson e Povey (2005) e Gregson (2002) utilizaram painéis sensoriais não treinados e com no máximo 15 avaliadores na tentativa de correlacionar medidas sensoriais e mecânicas de crocância. Todavia treinamentos extensivos reduzem a variabilidade entre os painelistas e aumentam a sua habilidade de discriminação (CHEN; OPARA, 2013).

O uso de escalas sensoriais é um método muito utilizado em pesquisas científicas (CHEN; OPARA, 2013). Na análise descritiva três tipos de escalas são mais comumente utilizadas: 1) estimativa de magnitude, 2) categórica e 3) linear. As escalas lineares, utilizadas em muitos estudos, buscam correlacionar medidas instrumentais e sensoriais, são representadas por uma linha horizontal, onde os julgadores marcam com um traço vertical a posição que indica a intensidade do atributo avaliado (STONE; SIDEL, 2004). A vantagem da utilização da escala linear é a ausência de um valor numérico associado com a resposta, minimizando as possíveis tendências do julgador em evitar ou preferir determinados números ou expressões (MINIM, 2013). Métodos clássicos de análise sensorial como a Análise Descritiva Quantitativa (ADQ), Perfil Livre e *Spectrum* também utilizam a escala linear.

A metodologia *Spectrum* abrange um procedimento desenvolvido por Civile em parceria com várias indústrias que buscavam uma forma de obter análises descritivas de seus produtos com repetibilidade e reprodutibilidade (MUÑOZ; CIVILLE, 1992, 1998). A principal característica deste método é que o painelista classifica a intensidade percebida com base na escala de intensidade absoluta pré-aprendida. Geralmente este método utiliza escalas lineares de 15 cm, as quais são padronizadas e ancoradas por uma série de pontos de referência (MEILGAARD; CIVILLE; CARR, 2007).

Apesar da análise sensorial ser o único método que representa a avaliação humana em relação à textura de um produto, Bourne (2002) listou diversas razões para se utilizar avaliações instrumentais ao invés da avaliação sensorial:

1) Leituras instrumentais custam menos do que avaliações sensoriais.

2) A maioria das leituras por instrumentos são obtidas mais rapidamente do que as avaliações sensoriais.

3) Instrumentos fornecem números, o que superficialmente parecem ser mais “científicos” do que resultados sensoriais. Alguns autores consideram avaliações sensoriais como opiniões ao invés de fatos.

4) Instrumentos fornecem resultados reprodutíveis, considerando que cada ser humano é diferente e até mesmo a mesma pessoa pode mudar de opinião de um dia para o outro.

5) Quando corretamente calibrado e operado, os instrumentos em diferentes localidades devem dar o mesmo resultado, o que oferece o potencial de se estabelecer padrões nacionais e internacionais para qualidade da textura.

2.3 Avaliação de Textura por Métodos Instrumentais

2.3.1 Métodos Mecânicos

A textura percebida na boca depende em grande parte do comportamento do alimento durante a quebra, sendo que a maior parte das pesquisas tem buscado determinar a textura a partir das propriedades mecânicas e reológicas dos alimentos (FOEGEDING; ÇAKIR; KOÇ, 2010). Um produto pode ser considerado crocante quando apresenta estrutura rígida e quebradiça, a fratura é rápida (propagação de fissuras) e possui baixa energia (EDMISTER; VICKERS, 1985). Segundo Vincent (1998) curvas com múltiplas irregularidades durante a quebra são características de produtos crocantes.

A medida objetiva mais prevalente para a determinação da crocância é obtida através de propriedades mecânicas. O texturômetro e a máquina universal de testes são equipamentos utilizados na determinação da textura de alimentos. Nos testes realizados a partir destes equipamentos as propriedades estruturais do alimento são reveladas por meio de resistência à compressão por uma lâmina/sonda e através de ensaios de tração (KILCAST, 2004).

Alguns testes imitam a mordida humana e envolvem o movimento de uma sonda à velocidade constante no produto alimentício. As sondas são usadas de várias maneiras, as quais incluem a ação de cisalhamento, perfuração ou compressão das amostras. Os dados obtidos com testes mecânicos levam a uma curva de força *versus* deformação (KILCAST, 2013).

Voisey (1976) sugeriu que os critérios para a seleção dos aparatos para os testes de propriedades mecânicas devem ser considerados da seguinte forma: suas leituras devem se relacionar com a análise sensorial, as condições de teste devem ser simples de replicar e o tamanho e a forma da amostra também devem ser previsíveis (KILCAST, 2004).

Entre os diversos testes de deformação, os testes de flexão e compressão são provavelmente os métodos mais utilizados. Esses testes imitam certos aspectos do processo de mastigação dentro da boca, aplicando uma alta pressão/estresse para causar a fratura ou a ruptura do alimento (CHEN; ENGELEN, 2012).

Os testes de perfuração usando um cilindro de pequeno diâmetro ou sondas cônicas também são amplamente utilizados devido à sua semelhança com a mordida humana, esses testes são particularmente úteis

para a avaliação da qualidade de frutas. A deformação e o comportamento da fratura são normalmente observados como uma função do tempo a uma taxa de deformação relativamente baixa para permitir a detecção detalhada de eventos de fratura individuais (CHEN, ENGELEN, 2012).

Embora os testes mecânicos sejam relativamente rápidos e fáceis de realizar, eles não produzem um grau de correlação suficientemente alto com a análise sensorial (KILCAST, 2004).

2.3.2 Métodos Acústicos

O ouvido humano é extremamente sensível à amplitude, frequência e duração do som considerado. O som percebido por humanos é precisamente analisado e o resultado interfere no julgamento do consumidor sobre as sensações associadas à mastigação e ingestão dos alimentos. Materiais capazes de emitir sons familiares ao consumidor são considerados atrativos e estes são reconhecidos como sinais de frescor ou propriedades resultantes do processamento deste alimento. Ondas acústicas geradas durante a mastigação são conduzidas aos ouvidos pelo ar, ossos e tecidos da bochecha e língua (MARZEC; LEWICKI; RANACHOWSKI, 2007).

O som é gerado durante a mordida ou a compressão de um alimento crocante. Com aplicação de uma força inicia-se um estresse dentro do produto até que um ponto crítico é atingido e a quebra da estrutura ocorre (CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; PIAZZA et al., 2007). Para que ocorra a emissão acústica do produto a quebra deve se desenvolver a uma velocidade acima de uma velocidade crítica. Luyten e van Vliet (2006) estimaram que, para a maioria dos produtos secos, a velocidade de quebra crítica esteja na faixa de 300-500 m.s⁻¹ (KILCAST, 2013).

Testes acústicos são baseados na captura do som produzido por produtos crocantes durante o processo de fratura (DRAKE, 1963; DUIZER, 2001). A principal técnica utilizada nos testes acústicos envolve a gravação do som durante a mordida e a mastigação (CHRISTENSEN; VICKERS 1981; EDMISTER; VICKERS, 1985; VICKERS, 1982) ou durante a fratura mecânica do material (ARIMI et al., 2010; SALVADOR et al., 2009; VARELA et al., 2006). O som gravado é submetido a várias análises para ser relacionado com a crocância.

2.3.2.1 Propriedades Acústicas

Do ponto de vista físico, som é gerado pela mudança de pressão e rarefação das moléculas geradas por uma fonte vibratória viajando através de um meio (MOORE, 1982). Para que este fenômeno ocorra há a necessidade da existência de três elementos: emissor, meio e receptor. O emissor produz o distúrbio no meio que será percebido pelo receptor (FERNANDES, 2002; LAZZARINI, 1998). As variações de pressão resultantes são traçadas em função do tempo para gerar uma forma de onda acústica. As formas de onda que ocorrem como resultado da quebra de produtos crocantes são complexas e exibem picos irregulares (KILCAST, 2013). Os sons audíveis aos seres humanos são aqueles que possuem frequência (número de flutuações acima e abaixo da condição ambiente) entre 20 Hz e 20 kHz (SELF, 2010).

O som por si só não pode ser medido, propriedades como potência sonora, intensidade sonora, espectro de som e sensação de volume sonoro podem ser quantificadas.

A sensação de volume sonoro é uma função não-linear da energia sonora que chega ao sistema auditivo e a quantificação desta sensação é realizada utilizando-se lei de Weber-Frechner, equação 1.1 (PAUL, 2017):

$$S = c \log \frac{E}{E_0} \quad (1.1)$$

Onde:

c: constante

E: estímulo

E_0 : estímulo de referência

S: sensação

Os níveis de intensidade sonora e de pressão sonora são relações logarítmicas entre grandezas que quantificam a sensação de volume sonoro e grandezas físicas que quantificam a energia sonora, conforme descrito pelas equações 1.2 e 1.3:

$$SIL \text{ ou } NIS = 10 \log \frac{I_{ef}}{I_0} \quad (1.2)$$

Onde:

I_{ef} : intensidade sonora eficaz

I_0 : intensidade sonora eficaz de referência – 1×10^{-12} W/m².

SIL ou NIS = nível de intensidade sonora (dB)

$$SPL \text{ ou } NPS = 20 \log \frac{P_{ef}}{P_0} \quad (1.3)$$

Onde:

P_{ef} : pressão sonora eficaz

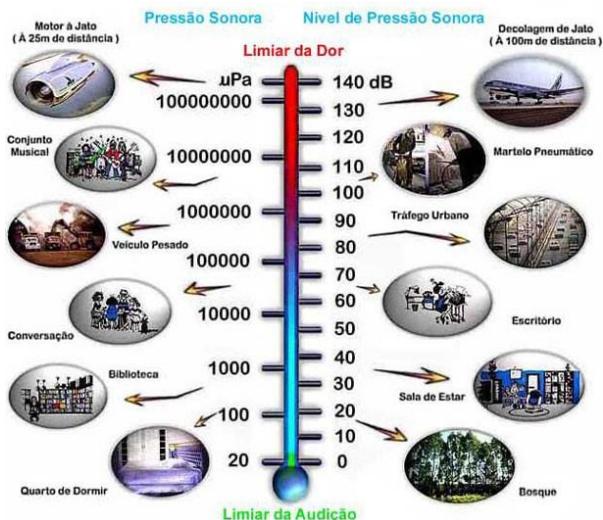
P_0 : pressão sonora eficaz de referência - 2×10^{-5} Pa

SPL ou NPS = nível de pressão sonora (dB)

Os níveis de pressão e intensidade sonora são dados em decibel (dB). O dB é uma relação logarítmica entre duas potências ou intensidades e permite relacionar mudanças nos parâmetros do sistema, como energia, tensão ou distância com às mudanças de nível percebidas por um ouvinte (SELF, 2010).

A Figura 1 relaciona a intensidade subjetiva da pressão sonora, gerada por algumas fontes de ruídos, com o nível de pressão sonora equivalente.

Figura 1: Relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora produzidos por algumas fontes de ruído



Fonte: Vibrasom (2017)

Os sons são normalmente compostos por várias frequências, sendo importante verificar quais frequências fazem parte de um som e qual é a energia contida em cada frequência. Os espectrogramas representam graficamente dados referentes a um sinal de áudio no domínio de tempo e frequência, sendo uma das principais ferramentas para a análise acústica

(FRENCH; HANDY, 2007). A representação destes gráficos é realizada por intensidade da coloração, sendo plotadas as faixas de frequência no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal. Sua representação mostra estrias horizontais, denominadas harmônicos (PONTES et al., 2002).

Os espectrogramas podem ser gerados a partir da análise de Fourier ou a partir de uso de filtro. A análise de Fourier demonstra que qualquer forma de onda pode ser decomposta em uma soma de ondas senoidais. A frequência destas ondas senoidais que formam o espectro guarda uma relação numérica com a frequência mais baixa da série que, por este motivo, é chamada de frequência fundamental (FERNANDES, 2002; LAZZARINI, 1998).

Durante a amostragem de sinais pode-se obter somente uma gravação finita do sinal. Isso resulta em uma forma de onda truncada, que possui características espectrais diferentes do sinal original. Esta descontinuidade produz a perda da informação espectral original. Uma maneira de aumentar as características espectrais de um sinal amostrado é pela aplicação de janelas sobre o mesmo, o janelamento minimiza as margens de transição em formas de onda truncadas, reduzindo dessa forma a perda espectral (ANDRADE; SOARES, 2018). Aplicar uma janela a um sinal no domínio do tempo é equivalente a multiplicar o sinal pela função que representa a janela. Existem várias funções conhecidas de janelamento, tais como: *Bartlett* (triangular), *Hanning (von Hann)*, *Hamming*, *Blackman* e *Kaiser*, as quais truncam os dados gradualmente e sua escolha irá depender do tipo de sinal que está em observação, se é conhecido ou não, ou de testes com diferentes métodos (LATHI, 1998).

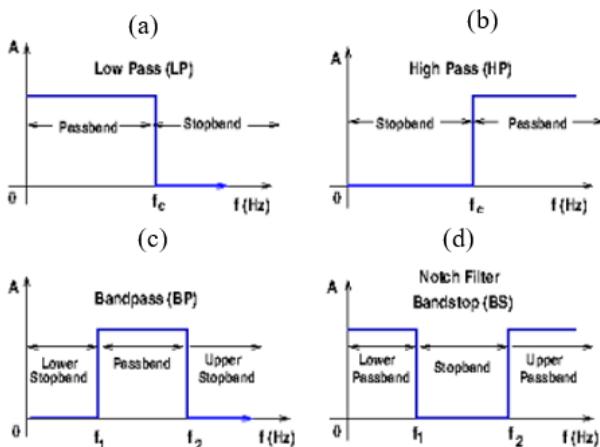
Sons considerados indesejáveis, denominados ruídos, muitas vezes aparecem durante a aquisição de sinais. Ruídos são normalmente sons de grande complexidade e resultantes da superposição desarmônica de sons provenientes de várias fontes. Seu espectro sempre será uma confusa composição de harmônicas sem qualquer classificação ou ordem de composição. Normalmente seu espectro é de banda larga (de frequências), compacto e uniforme, sendo comum aparecer uma maior predominância de uma faixa de frequências (graves, médias ou agudas) (CARTAXO, 2007; FERNANDES, 2002). Todavia, a atenuação de ruídos pode ser realizada com o uso de filtros digitais.

Um filtro digital é um sistema temporal discreto, projetado para passar o conteúdo espectral de um sinal de entrada em uma determinada banda de frequências. Sendo assim a função de transferência de um filtro forma uma janela espectral através da qual somente é permitida a passagem de parte desejada do espectro de entrada (SCANDELARI, 2018a). Os tipos de filtros normalmente utilizados são *low-pass* (passa-

baixa), *high-pass* (passa-alta), *bandpass* (passa-banda) e *bandstop* (corta-banda), sendo que outros tipos de filtros podem ser descritos através da combinação destes elementos básicos (SHIN; HAMMOND, 2008).

Na Figura 2 estão descritas as respostas ideais de cada um dos filtros citados acima. Os filtros de passa-alta e passa-baixa são filtros que permitem a passagem do sinal de áudio acima e abaixo respectivamente de uma determinada frequência, chamada de frequência de corte ou frequência de sintonia. Os filtros tipo passa-banda são uma combinação dos filtros passa-alta e passa-baixa, em que se pode definir uma frequência de corte inferior e outra superior (IAZZETTA, 2017). Filtros tipo passa-banda são úteis para selecionar uma banda específica de interesse, rejeitando as restantes. As bandas de corte (superior e inferior), correspondem às frequências para as quais se garante um nível mínimo de atenuação (ONUKEI, 2005). Já o filtro tipo corta-banda atenua severamente as frequências entre limites inferiores e superiores (CARR, 1996).

Figura 2: Magnitude de resposta de filtros ideais (a) *low-pass* (passa-baixa) (b) *high-pass* (passa-alta) (c) *bandpass* (passa-banda) e (d) *bandstop* (corta-banda)



Fonte: Scandelari (2018b)

Os filtros digitais são normalmente implementados através de uma das seguintes formas:

1) Filtro de resposta ao impulso infinita – IIR (*Infinite Impulse Response*)

Este tipo de filtro é também conhecido como filtro recursivo, pois o sinal de saída depende tanto dos valores de entrada quanto dos valores de saída anteriores. A recursividade faz com que os sinais de saída sejam infinitos, mesmo quando os sinais de entrada são cessados (SCANDELARI, 2018a).

2) Filtro de resposta ao impulso finita – FIR (*Finite Impulse Response*).

Filtros tipo FIR são não-recursivos e seu valor de saída depende apenas do valor de entrada e de um número finito de entradas passadas. A resposta deste tipo de filtro ao impulso é caracterizada por um número finito de impulsos (SCANDELARI, 2018a). Os filtros FIR são flexíveis, mais estáveis, possuem fase linear característica (não apresentando distorção de fase) e relativamente fáceis de serem implementados. Essas qualidades tornam os filtros FIR a escolha mais popular entre os projetistas de filtros (LATHI, 1998; SHIN; HAMMOND, 2008).

2.3.3 Métodos Instrumentais Combinados

Poucas pesquisas têm realizado a combinação de medidas de força/deslocamento e detecção acústica em alimentos. Esta combinação possui as vantagens das duas técnicas e deve ser capaz de revelar muito mais informação sobre a crocância dos alimentos do que a utilização das técnicas isoladas (CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005).

Propriedades de textura de diversos alimentos foram avaliadas a partir de métodos instrumentais combinados. Esses métodos foram utilizados na avaliação de textura alimentos como maçãs (CYBULSKA; PIECZYWEK; ZDUNEK, 2012; WIKTOR et al., 2016; ZDUNEK et al., 2008), batatas chips (TANIWAKI; KOHYAMA, 2012), produtos extrusados e de panificação (CHANVRIER et al., 2014; PIAZZA; GIGLI; BALLADIO, 2007), biscoitos de mandioca (SAELEAW; SCHLEINING, 2011), uvas (IWATANI et al., 2011), peras (TANIWAKI et al., 2009) e pêssegos (IGLESIAS et al., 2006).

Esses autores correlacionaram os dados obtidos através dos ensaios mecânicos com aqueles obtidos da detecção acústica durante o teste mecânico. Porém, nenhum dos precedentes trabalhos comparou os resultados obtidos com avaliações sensoriais.

2.4 Avaliação de Textura por Correlação de Análise Sensorial e Métodos Instrumentais

A correlação das medidas instrumentais com dados obtidos de medidas sensoriais é fundamental para validar os métodos instrumentais utilizados, sejam eles mecânicos ou acústicos. Alguns autores relataram que medidas sensoriais de crocância apresentam fortes relações com medidas acústicas-mecânicas (LIU; TAN, 1999; MOHAMED; JOWITT; BRENNAN, 1982; SEYMOUR; HAMANN, 1988).

Atualmente diversos estudos têm utilizado a solução comercial AED da *Stable Micro Systems* (Godalming, U.K) acoplado ao texturômetro, do mesmo fabricante, com a finalidade de capturar o som emitido durante os testes mecânicos. Chen, Karlsson e Povey (2005) mostraram que o uso do AED durante os testes mecânicos foi efetivo na detecção da emissão acústica durante a ruptura de biscoitos. Os autores encontraram uma excelente correlação entre o som gravado e a avaliação sensorial da crocância. A partir deste estudo diversos pesquisadores tem utilizado o AED acoplado ao texturômetro em busca de correlações com a análise sensorial. Chaunier et al. (2005) estudaram a crocância de cereais de milho e verificaram que as medidas acústicas foram mais efetivas em prever a crocância sensorial do que as medidas mecânicas. Varela et al. (2006) verificaram que a crocância sensorial de amêndoas torradas é altamente correlacionada com a taxa e o tamanho dos picos acústicos. Salvador et al. (2009) também utilizaram o AED acoplado ao texturômetro e encontraram que a crocância sensorial de batatas chips possui correlações com número de picos acústicos e mecânicos, $SPL_{M\acute{a}x,10}$ e área sob a curva. Costa et al. (2011) verificam em seu estudo sobre textura de maçãs que as medidas mecânicas conseguem caracterizar as frutas quanto à firmeza, mas que a crocância deste produto está mais correlacionada com os parâmetros acústicos, o que contribui para uma melhor correlação com a resposta sensorial. Kwak, Chang e Lee (2015) constataram que os modelos desenvolvidos para prever a crocância sensorial de batatas chips possuem um melhor ajuste quando ambas as medidas acústicas e mecânicas são consideradas. Piazza e Giovenzana (2015) também constataram que as medidas acústicas e mecânicas juntas são mais eficazes na determinação da crocância sensorial de maçãs do que as análises individuais. Jakubczyk, Gondek e Tryzno (2017) estudaram a textura de cereais extrusados e recheados utilizando tanto o AED quanto um sensor piezoelétrico para obtenção de medidas acústicas durante as análises mecânicas. Os pesquisadores encontraram boas correlações entre a textura sensorial, a textura mecânica e medidas acústicas.

Apesar dos resultados obtidos pelos autores mencionados acima, a solução comercial AED apresenta baixa taxa de aquisição de dados o que leva à perda de informações durante os ensaios de textura.

2.5 Análise Estatística Multivariada

Quando os ensaios realizados apresentam elevado número de variáveis, como no caso das análises instrumentais e sensoriais na determinação da textura de alimentos, torna-se necessário o uso dos procedimentos estatísticos multivariados. Conforme Mingotti (2005), quanto maior for o número de variáveis a serem utilizadas no estudo, mais complexa tornam-se as análises pelos métodos de estatística univariada, pois não basta conhecer informações estatísticas isoladas, é necessário também conhecer a totalidade das informações fornecidas pelo conjunto das variáveis e suas relações. Quando as relações existentes entre as variáveis não são percebidas, efeitos desconhecidos, entre variáveis, dificultam a interpretação do fenômeno a partir das variáveis isoladas.

A análise multivariada é uma análise exploratória de dados, com o objetivo de gerar hipóteses, e não tecer confirmações a respeito dos mesmos (CRUZ; TOPA, 2009).

2.5.1 Análise Fatorial

A técnica de Análise Fatorial (AF) foi criada no início do século passado por Spearman (SPEARMAN, 1904) para obtenção de um índice geral de inteligência (fator “g”). O grande número de variáveis consideradas em muitos problemas torna necessário o conhecimento da interdependência (correlação) entre essas.

A análise fatorial fornece a melhor explicação sobre quais variáveis podem atuar juntas e quantas variáveis podem impactar na análise, além disso, esta técnica estatística busca nos dados originais uma estrutura linear reduzida, gerando um novo conjunto de variáveis independentes, os fatores. Esses fatores são combinações lineares, estimados por componentes principais (JOHNSON; WICHERN, 1992).

A carga fatorial é o meio de interpretar o papel que cada variável tem na definição de cada fator, sendo que cargas fatoriais maiores representam variáveis de maior representatividade do fator. Logo, o primeiro fator será aquele com melhor resultado de relações lineares da expressão dos dados, e o segundo fator é definido como a segunda melhor combinação linear das variáveis, e assim sucessivamente (CRUZ; TOPA, 2009).

O modelo fatorial supõe que as variáveis podem ser agrupadas por suas correlações, e que variáveis pertencentes a um mesmo grupo são altamente correlacionadas entre si, mas possuem correlação relativamente pequena em relação às variáveis de outros grupos. Devido ao fato de que a análise fatorial identifica e agrupa conjuntos de variáveis inter-relacionadas, para justificar seu uso, deseja-se que haja certo grau de multicolinearidade entre as variáveis (uma variável pode ser explicada por outra variável) (CRUZ; TOPA, 2009). Basicamente dois tipos de testes podem ser realizados para verificar se a análise de fatores é aplicável às amostras, são eles: teste de esfericidade de *Bartlett* e o critério de *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO), além disso a matriz de correlação deve indicar correlações aceitáveis entre as amostras.

O teste de esfericidade de *Bartlett* testa a hipótese nula de que a matriz de correlação é uma matriz identidade, ou seja, possui diagonal igual a 1 e todas as outras medidas iguais a zero, sendo assim que não há correlação entre as variáveis. Se essa hipótese for rejeitada, então a análise fatorial pode ser aplicada (FERREIRA JÚNIOR, 2004). O teste de esfericidade de *Bartlett* é mais eficiente em detectar as correlações na medida em que se aumenta o tamanho da amostra (CRUZ; TOPA, 2009).

O critério de *Kaiser-Meyer-Olkin* é outra forma para identificar se o modelo de análise fatorial que está sendo utilizado está adequadamente ajustado aos dados, isto se dá testando a consistência geral dos dados. O método verifica se a matriz de correlação inversa é próxima da matriz diagonal. Consiste em comparar os valores dos coeficientes de correlação linear observados com os valores dos coeficientes de correlação parcial. A medida de adequacidade que fundamenta esse princípio é dada pela seguinte expressão:

$$KMO = \frac{\sum \sum r_{jk}^2}{\sum \sum r_{jk}^2 + \sum \sum a_{jk}^2} \quad (1.4)$$

Onde:

$j \neq k$

r_{jk} é o coeficiente de correlação simples entre as variáveis X_j e X_k ;

a_{jk} é o coeficiente de correlação parcial entre X_j e X_k , dados os outros X_s

Para interpretação do critério de KMO, os valores vão variar de 0 a 1, pequenos valores de KMO indicam que o uso da análise fatorial não é adequado, e quanto mais próximo de 1, mais adequada é a aplicação da análise fatorial aos dados. Valores inferiores a 0,6 indicam que a adequação dos dados para análise fatorial é imprópria (PEREIRA, 2001).

A extração dos fatores pode decorrer dos modelos de análise de fatores comuns e da análise de componentes principais, sendo ambas as técnicas de bons resultados, porém o método de análise por fatores comuns possui suposições limitadas, e por isso há uma maior utilização da análise de componentes principais (HAIR et al., 2005).

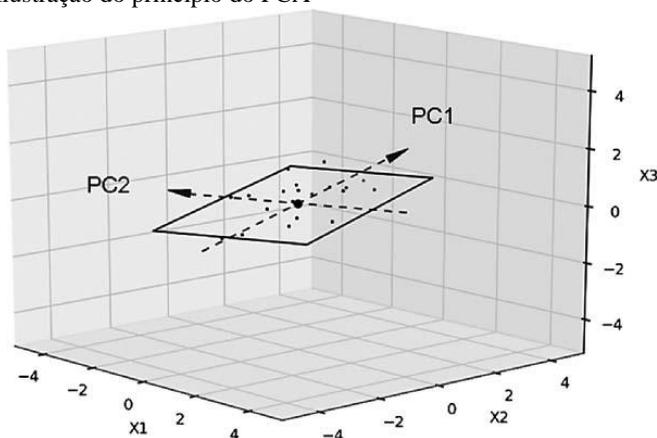
2.5.1.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

Muitas técnicas estatísticas estão disponíveis, mas quando se trata de examinar a estrutura e a relação entre um conjunto de dados a técnica mais comum é a análise de componentes principais (PCA). O PCA é uma técnica de redução que substitui um grande número de variáveis originais por um pequeno número de combinações lineares, enquanto ainda explica uma proporção substancial da variação original dos dados. Essencialmente, o PCA projeta um espaço n-dimensional em um gráfico bidimensional (KILCAST, 2004). Esta análise é considerada um método fatorial, pois a redução do número de variáveis não se faz por uma simples seleção de algumas variáveis, mas pela construção de novas variáveis sintéticas, obtidas pela combinação linear das variáveis iniciais, por meio dos fatores (BOUROCHE, 1982).

O PCA é baseado na ideia de num espaço de alta dimensão encontrar a direção mais importante de variabilidade de todas as variáveis medidas e apresentar os resultados em gráficos que podem ser utilizados para interpretações simples (NAES; BROCKHOFF; TOMIC, 2010). A forma mais simples de redução de dimensões é tomar apenas um elemento do vetor observado e descartar todos os outros (HÄRDLE; SIMAR, 2007).

Para a determinação dos componentes principais, é necessário calcular a matriz de variância-covariância, ou a matriz de correlação, encontrar os autovalores e os autovetores e, por fim, escrever as combinações lineares, que serão as novas variáveis, denominadas de componentes principais, sendo que cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, independentes entre si (REGAZZI, 2001).

A Figura 3 mostra um gráfico de dispersão de três variáveis medidas num espaço tridimensional. O centro dos dados é representado pelo grande ponto no meio e a direção dos dois componentes principais é ilustrada por setas. O terceiro componente principal desempenha neste caso um papel menor, uma vez que os dados estão próximos de um plano (NAES; BROCKHOFF; TOMIC, 2010).

Figura 3: Ilustração do princípio do PCA

Fonte: Naes, Brockhoff e Tomic (2010)

O primeiro passo do PCA é calcular a média de todas as variáveis, na Figura 3 ela está representada pelo maior ponto no centro dos dados. Em seguida a média de cada variável é subtraída das suas variáveis correspondentes, isto corresponde a mover a origem das coordenadas do sistema ou do espaço vetorial para um ponto médio (\bar{x}). O próximo passo é procurar a direção no espaço que contenha a maior variância possível. Isto corresponde a encontrar a direção definida pelo vetor unitário \hat{p}_1 (comprimento igual a 1) que passa pelo ponto médio (\bar{x}) e vai em direção a maior variabilidade possível. Considerando-se uma direção arbitrária indicada pelo vetor \hat{p} e todos os pontos de dados (vetor y) que estão nesta direção, o vetor de dados y pode ser escrito como $\hat{p}\hat{t}$, ou seja, o produto do vetor \hat{p} e da coordenada \hat{t} . A direção do primeiro componente principal \hat{p}_1 é então definida como a direção na qual a variância da coordenada \hat{t} se torna tão grande quanto possível, o primeiro componente principal pode então ser descrito como $\hat{t} = \hat{p}^T y$ que é simplesmente uma correlação linear das variáveis medidas. Na Figura 3 a flecha que vai em direção à direita do gráfico representa o primeiro componente principal (NAES; BROCKHOFF; TOMIC, 2010).

A próxima etapa é encontrar o segundo componente principal, o mesmo processo é realizado com a condição de que, a direção do segundo componente principal seja ortogonal à direção do primeiro. Na Figura 3 a flecha que vai em direção à esquerda do gráfico representa o segundo componente principal. O processo para encontrar os demais componentes

principais é o mesmo, sempre respeitando a condição de ortogonalidade entre a direção do novo componente e a direção do componente anterior (NAES; BROCKHOFF; TOMIC, 2010).

Dois critérios podem ser utilizados na definição do número de componentes a serem utilizados. O primeiro deles foi sugerido por Cattell (1966) e é também conhecido como método gráfico. No método gráfico a porcentagem de variação explicada pelo componente é plotada nas ordenadas e os autovalores em ordem decrescente nas abscissas, quando esta porcentagem diminui e a curva começa a ficar quase paralela ao eixo das abscissas, os componentes que restam são excluídos da análise pois possuem pouca informação. O segundo critério de seleção foi sugerido por Kaiser (1960 apud Mardia, Kent e Bibby, 1979) consiste em incluir somente aqueles componentes cujos valores sejam superiores a 1. Quando o número de variáveis for inferior a vinte, em geral, utilizam-se aqueles componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada em torno de 70% (VICINI, 2005).

2.6 Banana

A banana é a fruta de maior consumo mundial depois dos cítricos, fazendo-se presente na dieta das diferentes camadas sociais, seja pela sua importância nutritiva, seja em função do seu preço acessível ao público consumidor e, sobretudo, pelo seu sabor. No Brasil, o consumo é de 34,5 kg/hab/ano, confirmando a elevada demanda do mercado doméstico pelo produto (DANTAS et al., 1997; MATSUURA; COSTA; FOLEGATTI, 2004).

Segundo dados da Faostat (2017), em 2016 a produção mundial de bananas foi de 113 milhões de toneladas. O Brasil está na quarta colocação quanto aos principais países produtores desta fruta. A produção brasileira de banana é destinada principalmente ao consumo interno, o que faz do Brasil o primeiro consumidor mundial de bananas (LIMA; SILVA; FERREIRA, 2012). Em 2016, a produção nacional de bananas foi cerca de 6,7 milhões de toneladas, sendo a região nordeste responsável por aproximadamente 33% da produção total do país (EMBRAPA, 2017; FAOSTAT, 2017).

Do ponto de vista biológico, a banana é um dos frutos que apresenta uma das maiores perdas por decomposição pós-colheita visto ser ela extremamente perecível. Portanto, a industrialização é uma das formas mais indicadas para um melhor aproveitamento da produção (SILVA et al., 1995).

A secagem convencional com ar quente tem sido amplamente utilizada para a produção de bananas desidratadas. No entanto, a banana possui um alto conteúdo de açúcar e a secagem convectiva desta fruta requer altas temperaturas e prolongados tempos de secagem, o que causa vários efeitos adversos no sabor, cor, textura e nutrientes no produto final (MASKAN, 2000). As maiores desvantagens da secagem por ar quente são a baixa eficiência energética e os longos tempos de secagem no período de taxa decrescente, devidos à baixa condutividade térmica que limita a transferência de calor para o interior do alimento durante o aquecimento convencional (FENG; TANG, 1998).

2.7 Secagem

A secagem é uma das operações unitárias mais comumente utilizadas para a preservação dos alimentos, sendo realizada desde os tempos pré-históricos pois permite prolongar a vida útil dos alimentos. Com o passar do tempo a demanda por alimentos cresceu com o aumento populacional. A secagem é especialmente útil para propósitos militares já que reduz o peso e o tamanho dos alimentos. Os avanços alcançados com a alimentação militar foram transferidos para a indústria de secagem em geral, atingindo grandes avanços na indústria de secagem de alimentos como um todo (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).

Em maior ou menor grau, a água em alimentos é eliminada durante o processo de secagem, levando à diminuição da atividade de água (a_w). Baixos níveis de a_w criam um ambiente desfavorável ao crescimento microbiano e retardam muitas reações indesejáveis. Além de permitir um aumento da vida útil dos alimentos, a secagem pode também diminuir tamanho e peso do produto final facilitando o manuseio, estocagem e o transporte desses alimentos (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).

Existem diversos processos de secagem utilizados no processamento de alimentos. Alguns desses processos são apresentados a seguir.

2.7.1 Secagem Convectiva

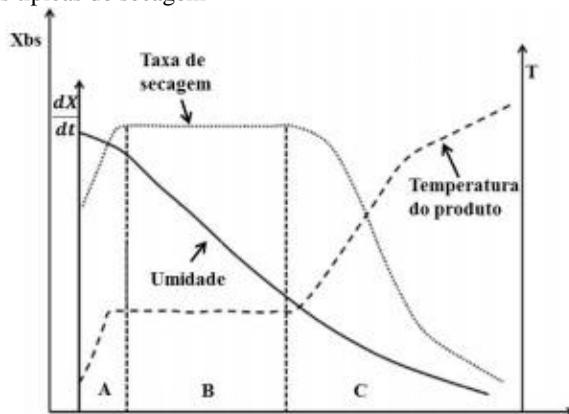
Na secagem convectiva a água é eliminada da superfície do alimento e retirada do interior do secador junto com o ar quente que deixa o mesmo, numa operação simples. A configuração básica de um secador por ar quente consiste de uma câmara, onde o alimento é introduzido, e é equipado com ventiladores e tubos que permitem a circulação do ar quente através e ao redor do alimento. O ar é aquecido na entrada do

secador por trocadores de calor ou diretamente com uma mistura de gases de combustão. De uma maneira geral, o calor fornecido pelo ar quente é absorvido pelo produto, fornecendo o calor latente necessário para evaporar a água (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003). Quando um sólido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente (FELLOWS, 2006):

- 1) Transferência de energia (principalmente como calor) do ambiente circundante para evaporar a umidade da superfície;
- 2) Transferência da umidade interna para a superfície do sólido e subsequente evaporação devido à aplicação de energia.

A Figura 4 mostra uma curva típica de cinética de secagem, a curva da taxa de secagem, e a evolução da temperatura do produto durante o processo.

Figura 4: Curvas típicas de secagem



Fonte: Adaptado de Park et al. (2007)

O processo de secagem de um material pode ser descrito por uma série de estágios nos quais a taxa de secagem desempenha um papel fundamental. No início do processo de secagem o sólido está, geralmente, em uma temperatura inferior à temperatura do ar de secagem (região A da Figura 4), nesta etapa a temperatura da superfície do produto aumenta rapidamente. Na região B a temperatura da superfície alcança uma temperatura de equilíbrio, que corresponde aproximadamente à temperatura do bulbo úmido (GEANKOPLIS, 1993).

O tempo decorrido de A para B geralmente é baixo e é negligenciado no cálculo do tempo de secagem. A região B da curva é conhecida como o período de taxa de secagem constante e está associada

à remoção de água não ligada ao produto. Nesta seção, a água se comporta como se o sólido não estivesse presente. Inicialmente, a superfície do produto é muito úmida. Em sólidos porosos, a água removida da superfície é compensada pelo fluxo de água do interior do sólido. O período de taxa constante continua, enquanto a água evaporada na superfície pode ser compensada pela água interna (GEANKOPLIS, 1993).

O período de taxa decrescente começa quando a taxa de secagem não pode ser mantida constante por mais tempo e começa a diminuir e a atividade da água na superfície torna-se menor do que um. Neste caso, a taxa de secagem é regida pelo fluxo interno de água e vapor de água. A região C representa o período de taxa decrescente, que pode ser dividido em duas etapas. O primeiro estágio ocorre quando os pontos de umidade na superfície diminuem continuamente até a superfície estar completamente seca, enquanto no segundo estágio do período de queda a superfície está completamente seca e a frente de evaporação se move para o interior do sólido. O calor necessário para remover a umidade é transferido através do sólido para a superfície de evaporação, e o vapor de água produzido move-se através do sólido na corrente de ar que vai em direção à superfície. A quantidade de água removida durante este período pode ser pequena, enquanto o tempo necessário pode ser longo já que a taxa de secagem é baixa (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).

2.7.2 Liofilização

A liofilização foi desenvolvida para superar a perda de compostos responsáveis pelo aroma em alimentos, quando secados por secagem convencional (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1997). O processo de liofilização consiste em dois estágios: no primeiro estágio, o produto é congelado e no segundo estágio, o produto é seco por meio de sublimação do gelo sob pressão reduzida.

A liofilização é um método eficaz para ampliar a vida útil dos alimentos. Isto ocorre devido a duas características importantes: a primeira delas é a ausência de ar durante o processamento, que, juntamente com a baixa temperatura, previne a deterioração devida à oxidação ou modificações do produto. A segunda é a realização da secagem a uma temperatura inferior à temperatura ambiente, que permite conservação dos componentes sensíveis ao calor e da estrutura do produto (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003). Além disso, o estado sólido da água durante a liofilização protege a estrutura primária e a forma dos produtos com o mínimo encolhimento. Embora o processo permita a

obtenção de produtos de qualidade muito elevada, a liofilização tem sido descrita como o processo mais caro e demorado para obtenção de produtos desidratados (RATTI, 2001).

2.7.3 Secagem a Vácuo

A secagem a vácuo é um importante processo para aquecimento de materiais sensíveis. As baixas temperaturas de evaporação obtidas sob vácuo permitem que o método possa ser utilizado em materiais que se descolorem ou se degradam quando submetidos à altas temperaturas (SAGAR; SURESH, 2010).

Na secagem a vácuo, devido à redução de pressão, o ponto de ebulição da água é reduzido para uma temperatura inferior a 100°C. A pressão de vácuo a ser aplicada e a temperatura de secagem dependerão da sensibilidade do material à taxa de secagem e à temperatura. Este método de secagem não é muito comum na indústria de alimentos devido ao alto custo. O método tem sido utilizado na desidratação de sucos cítricos, flocos de maçã e vários outros produtos sensíveis ao calor nos quais a retenção de ácido ascórbico é importante. A faixa de temperaturas utilizadas durante esta secagem varia de 35 a 60 °C. Assim como os produtos liofilizados, os produtos secos sob vácuo são bastante higroscópicos, portanto, é preciso ter um cuidado especial durante a embalagem do material para protegê-lo da absorção de umidade (MUJUMDAR, 2006).

2.7.4 Explosão ou *Puffing Drying*

A técnica conhecida como explosão ou *puffing drying* foi inicialmente desenvolvida para secar frutas e vegetais em grandes pedaços. O método consiste em uma secagem inicial dos pedaços das frutas e vegetais utilizando ar quente, em seguida são aplicadas altas temperaturas que geram vapor no interior do alimento. A camada formada pela secagem inicial com ar quente impede que o vapor saia do interior do alimento, aumentando a pressão interna do produto. Por fim, o sistema é descomprimido e poros são gerados devido à expansão dos vapores que força as paredes do produto (explosão *puffing*) (VARNALIS; BRENNAN; MACDOUGALL, 2001).

A remoção da umidade inicial neste tipo de processo é considerada importante para que não ocorra a desintegração do material, o efeito *puffing* leva a produtos com maior porosidade, menor dureza e com menor escurecimento quando comparados com métodos de desidratação com ar

quente. Além disso, foi constatado menor tempo de processo devido à modificação dos fenômenos de transporte de massa, sendo normalmente eliminado o processo de difusão, que controla a taxa de secagem em processos convencionais (MUJUMDAR, 2006).

2.8 Texturização de Produtos a Partir da Secagem

A crocância pode ser uma característica do material *in natura* ou ser obtida através do método de secagem empregado. Diversas técnicas de secagem têm sido empregadas na produção de alimentos desidratados crocantes. Para muitos autores os parâmetros críticos da secagem são a velocidade da desidratação e a difusividade da água. Do ponto de vista do produto, as propriedades de cor, capacidade de reidratação e encolhimento são determinantes na qualidade do produto seco (AGUILERA, 2005). O encolhimento das células é o fenômeno que causa maiores modificações estruturais no produto durante o processo de secagem e está diretamente relacionado com a perda de água (PORCIUNCULA, 2010) e a crocância do produto.

Durante o processo de secagem a microestrutura do alimento é modificada, reestruturada, reorganizada ou destruída (AGUILERA; STANLEY, 1999), sendo assim, a estrutura do produto desidratado depende da natureza do material e das condições de secagem (AGUILERA; STANLEY, 1999; MADIOULI et al., 2007). Estudos têm evidenciando a forte influência do processo e das condições de secagem na densidade, porosidade e encolhimento dos frutos (PORCIUNCULA; SEGURA; LAURINDO, 2016).

Zotarelli, Porciuncula e Laurindo (2012) avaliaram a textura de bananas e mangas desidratadas por CMFD (*Convective multi-flash drying*), secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização e verificaram maior encolhimento das amostras nos processos de secagem convectiva, maior expansão no processo de CMFD e preservação da estrutura do produto após o processo de liofilização. Além disso, os autores relataram que os gráficos de força *versus* deformação indicaram que as frutas desidratadas por CMFD apresentaram curvas irregulares, características de produtos crocantes e quebradiços. Porciuncula, Segura e Laurindo (2016) estudaram a influência dos métodos de secagem, KMFD (*Conductive multi-flash drying*), secagem convectiva e secagem a vácuo na formação da microestrutura e textura de bananas. Os autores verificaram que as frutas desidratadas por ar quente sofreram um maior encolhimento e apresentaram menor porosidade, enquanto os frutos secos por KMFD exibiram maiores valores de porosidade e uma estrutura mais

aberta, devido ao efeito *puffing* causado pelo aquecimento-pulso de vácuo. O método KMFD levou a uma fruta mais crocante, do ponto de vista mecânico. Monteiro, Carciofi e Laurindo (2016) produziram bananas desidratadas por meio dos seguintes processos de secagem: liofilização, micro-ondas a vácuo e micro-ondas com múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo e verificaram que, esta última técnica de secagem foi a mais efetiva em produzir bananas crocantes, com base nas irregularidades das curvas dos gráficos de força *versus* deformação. Link, Tribuzi e Laurindo (2017a) desidrataram fatias de mangas por meio dos processos de KMFD, liofilização, secagem a vácuo e secagem convectiva. Os autores verificaram que a porosidade e a textura das amostras secas por KMFD foram similares às observadas pelas amostras liofilizadas, enquanto os processos de secagem a vácuo e secagem por ar quente levaram a produtos mais compactados, com menor porosidade e menor crocância.

Os autores dos trabalhos citados neste parágrafo utilizaram métodos instrumentais mecânicos para determinar a crocância dos produtos desenvolvidos, considerando mais crocantes os produtos com maior número e amplitude de picos.

3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE APARATO PARA OBTENÇÃO DE MEDIDAS SIMULTÂNEAS MECÂNICAS E ACÚSTICAS DE ALIMENTOS CROCANTES

3.1 Introdução

A textura é um multi-parâmetro complexo e um importante atributo sensorial. Detectada apenas pelos sentidos humanos é essencial na aceitação pelos consumidores de alguns produtos alimentícios (LAWLESS; HEYMANN, 2010).

A textura auditiva pode contribuir com o prazer em comer alguns alimentos, exemplos são os sons crocantes (*crispy*) associados ao consumo de alguns cereais matinais ou o som crocante (*crunch*) associado ao consumo de uma maçã suculenta. Os consumidores costumam associar o som como indicativo da qualidade dos alimentos (LAWLESS; HEYMANN, 2010).

A crocância é um parâmetro de textura que contribui para a experiência sensorial. Szczesniak (1988) e Szczesniak e Klein (1963) salientaram a importância da crocância para os consumidores e Drake (1963) e Vickers e Bourne (1976) relataram a percepção deste atributo pelas sensações auditivas (VARELA et al., 2006).

Atualmente, a crocância é medida por variáveis sensoriais, mecânicas, morfológicas e poucos trabalhos relatam a medida do som emitido pelo alimento quando submetido à força (ARIMI et al., 2010; CHAUNIER et al., 2005; CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; COSTA et al., 2011; GIACOSA et al., 2016; JAKUBCZYK; GONDEK; TRYZNO, 2017; KWAK; CHANG; LEE, 2015; PIAZZA; GIOVENZANA, 2015, ROUDAUT et al. 2002; SAELEAW; SCHLEINING, 2011; SALVADOR et al., 2009; TANIWAKI; KOHYAMA, 2012, VARELA et al., 2006). A análise sensorial, por apresentar uma descrição mais completa da textura, é amplamente utilizada em estudos científicos para avaliar as características percebidas de produtos alimentícios secos crocantes (CHAUNIER et al., 2005). No entanto, técnicas instrumentais apresentam algumas vantagens, especialmente em ambientes industriais onde os métodos fáceis e rápidos apresentam grandes demandas e são economicamente mais viáveis (ROUDAUT et al., 2002). Por esse motivo tem havido um grande interesse no desenvolvimento de técnicas instrumentais para avaliar a crocância de alimentos.

Dentre as técnicas instrumentais, a análise mecânica é muito utilizada na determinação da textura de alimentos, sendo determinada

utilizando-se um equipamento de teste universal ou um texturômetro (KILCAST, 2004), porém o uso desta técnica isolada não é capaz de determinar a textura de alimentos crocantes.

Medições acústicas podem ser combinadas às medições mecânicas (força *versus* deformação) para melhor descrever a crocância dos alimentos (VICKERS, 1987a; SZCZESNIAK, 1988).

Atendendo às demandas de indústrias e universidades, a *Stable Micro Systems* (Godalming, U.K.) (fabricante de equipamentos para analisar textura e caracterizar pós), desenvolveu um método de medição da liberação de energia acústica durante testes mecânicos, chamado de AED. O sistema acústico, que utiliza um microfone e um pré-amplificador de som e vibração, tem alta sensibilidade às frequências emitidas por produtos quebradiços e baixa sensibilidade ao ruído mecânico emitido pelo texturômetro. O sistema contém todos os componentes necessários para conexão a um texturômetro TA-XT2 Plus, sincronizando força com o som emitido durante os testes individuais (STABLE MICRO SYSTEM, 2018).

Atualmente muitos estudos têm utilizado o AED acoplado a um texturômetro para a detecção de emissões acústicas durante a ruptura de produtos (CHAUNIER et al., 2005; CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; COSTA et al., 2011; GIACOSA et al., 2016; JAKUBCZYK; GONDEK; TRYZNO, 2017; KWAK; CHANG; LEE, 2015; PIAZZA; GIOVENZANA, 2015; SAELEAW; SCHLEINING, 2011; SALVADOR et al., 2009; TANIWAKI; KOHYAMA, 2012, VARELA et al., 2006). Porém, juntamente ao elevado valor comercial da solução AED, a baixa taxa de aquisição de dados acústicos possibilitada por este equipamento leva a perdas da parte de alta frequência do espectro de som emitido, desta forma, a utilização de taxas de aquisição mais altas é um importante aspecto a ser considerado.

Dados da literatura demonstram que poucos estudos têm utilizado altas taxas de aquisição de dados acústicos, que variam de 44 kHz (CHANVRIER et al., 2014, MARZEC; KOWALSKA; PASIK, 2009; TESCH; NORMARND; PELEG, 1996) a 65 kHz (CASTRO-PRADA et al., 2007; SANZ; PRIMO-MARTÍN; VLIET, 2007). Arimi et al. (2010) utilizaram as mesmas amostras que Chen, Karlsson e Povey (2005) para comprovar que, com altas taxas de aquisição de dados acústicos (50 kHz) mais picos acústicos são observados quando comparados ao número obtido utilizando o AED. Castro-Prada et al. (2007) utilizaram duas taxas de aquisição de dados acústicos e mecânicos, 500 Hz e 65 kHz para comprovar graficamente que muitos dados são perdidos quando uma baixa taxa de aquisição de dados é utilizada.

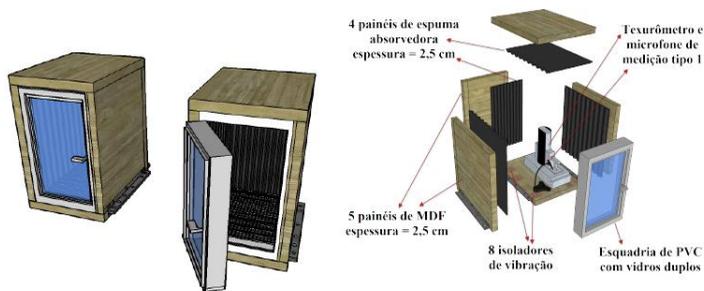
Durante as realizações das medidas mecânicas, o motor e a caixa de engrenagens do texturômetro produzem ruídos com frequências que podem atingir 1 kHz e interferir nas análises dos dados acústicos gerados a partir dos testes mecânicos (CHAUNIER et al. 2005; CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; GONDEK; LEWICKI; RANACHOWSKI, 2006). O uso de filtros de passa-alta para suprimir o ruído do texturômetro é descrito em muitos estudos. Arimi et al. (2010) descreveram o uso de filtros de passa-alta na 3ª oitava com frequência de corte de 1,5 kHz, outros autores utilizam filtros de passa-alta com frequência de corte de 1 kHz (GONDEK; LEWICKI; RANACHOWSKI, 2006; SALVADOR et al., 2009; VARELA et al, 2006) ou 3,125 kHz (COSTA et al., 2011; TANIWAKI; KOHYAMA, 2012).

O objetivo deste trabalho foi acoplar e validar um sistema para medidas acústicas, com alta taxa de aquisição de dados, a um sistema de medidas mecânicas a fim de obter medidas simultâneas de alimentos crocantes em um sistema de menor custo. A validação do sistema consistiu em avaliar a eficiência da utilização de uma câmara semi-anecoica, filtros para atenuar ruídos e diferentes posicionamentos do microfone no sistema, durante testes com bananas desidratadas e torradas comerciais.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Construção da caixa acústica

Para reduzir a influência do ruído de fundo da sala onde a análise seria realizada, uma câmara semi-anecoica medindo 800 x 600 x 680 mm³ foi construída utilizando painéis de MDF de alta densidade com 25 mm de espessura no chão, paredes e teto. Uma janela de PVC de vidro duplo foi instalada na porta da caixa acústica para oferecer visibilidade da parte interna durante a realização dos experimentos. Todas as paredes internas de PVC da caixa acústica foram recobertas por 25 mm de uma espuma perfilada absorvente de som, modelo 75/75 (SONEX Iltec, OWA sonex, Diadema, Brasil). Um microfone *free-field* tipo 1, de ½” (G.R.A.S. Modelo 46AE, sensibilidade de 52,27 MV/Pa) foi conectado a um pré-amplificador e a um conversor (National Instruments 9234AD, Austin, EUA) com 24-bit e 102 dB de alcance dinâmico que foi utilizado como sistema de aquisição de sinal.

Figura 5: Visão esquemática da caixa acústica construída

Fonte: Murta, Aguirre e Paul (2017)

O texturômetro (Stable Micro Systems, Godalming, UK) e o microfone foram colocados dentro da câmara de isolamento acústico conforme é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Câmara com isolamento acústico construída para as medições de som realizadas durante a fratura dos produtos

Fonte: o Autor

3.2.2 Determinação do ruído de fundo e aplicação de filtros digitais

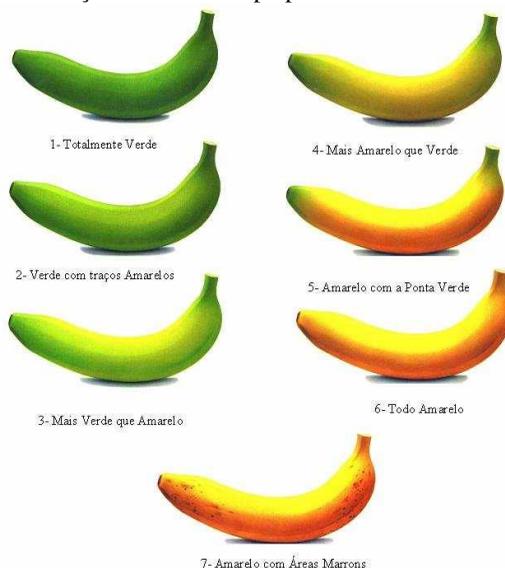
O ruído de fundo foi determinado utilizando o *hardware* definido para o sistema de medição acústica. O microfone *free-field* tipo 1, de ½" (G.R.A.S. Modelo 46AE, sensibilidade de 52,27 MV/Pa) foi posicionado no interior da clausura, sem o texturômetro, e acoplado à placa de aquisição de sinais (National Instrument 9234AD, Austin, EUA). Uma medição de 30 segundos foi realizada com a porta do gabinete fechada, e outra com a porta aberta. Os níveis de pressão sonora global e por banda de 1/3 de oitava foram calculados via MATLAB (MathWorks Inc, EUA).

O sistema foi calibrado com um calibrador acústico de referência B&K 4231, que emite um sinal tonal de 1 kHz a 94 dB SPL.

O motor e a caixa de engrenagens do texturômetro também produzem um ruído de fundo quando acionados. A distribuição de frequências destes ruídos foi determinada a partir de ensaios realizados durante o acionamento do equipamento sem amostras. O filtro tipo passa-alta proposto por Arimi et al. (2010) com frequência de corte de 1,5 kHz foi utilizado com a finalidade de atenuar os ruídos resultantes do acionamento do texturômetro.

3.2.3 Matéria-prima

Dois tipos de amostras foram utilizados para a validação do equipamento, torrada (Bauducco, Guarulhos, Brasil) tipo tradicional foram compradas no mercado local (Florianópolis, Brasil) e bananas da variedade Prata desidratadas por KMFD. As bananas foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, Brasil). As frutas foram selecionadas pelo grau de maturação, determinado pela análise visual (Figura 7 – Grau de maturação: 5) e conteúdo de sólidos solúveis (SST) (usando um refratômetro óptico Pocket refractometer Atago, Modelo - PAL-BX/RI, Japão). As bananas selecionadas apresentaram SST = $23,0 \pm 0,1$ °Brix. As frutas foram descascadas e fatiadas com uma espessura de 5 mm.

Figura 7: Escala de maturação de bananas tipo prata

Fonte: Von Loesecke (1950)

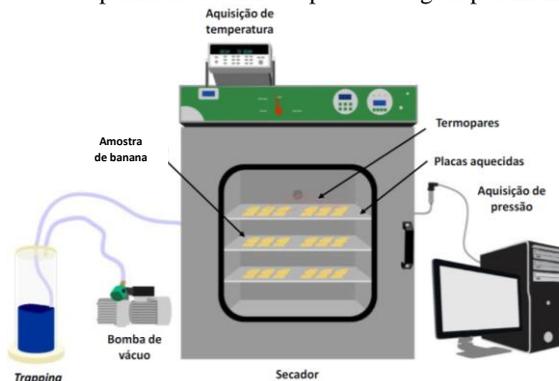
3.2.4 Secagem por *conductive multi-flash drying* (KMFD)

A fim de validar o equipamento, bananas fatiadas foram secadas em aparato experimental conforme descrito por Porciuncula, Segura e Laurindo (2016). Uma câmara de secagem de 100 L (440-DE, Ethik Technology, Brasil) conectada a uma bomba de vácuo com capacidade de bombeamento de $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (LC305-DVP Vacuum Technology, Itália) foi utilizada na secagem. No interior da câmara de secagem, placas metálicas foram mantidas aquecidas ($90 \text{ }^\circ\text{C}$) com resistências elétricas, com temperaturas controladas por um controlador PID (proporcional-integral-derivativo). A pressão do sistema foi monitorada durante a secagem através de um manômetro digital (IT-MN-DG, Velki, Itu, Brasil).

Na Figura 8 é apresentado um diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para a secagem. A variação do tempo-temperatura das amostras foi monitorada utilizando termopares do tipo T (A-TX-TF-TF-R30AWG, Iope, São Paulo, Brasil), inseridos em cinco amostras em diferentes locais do secador, e conectados a um sistema de aquisição de dados (34970A, Agilent Technologies, EUA). Os

termopares foram hermeticamente conectados à estufa através de um flange (Kaye feed thru, General Electric- EUA).

Figura 8: Dispositivo experimental utilizado para a secagem por KMFD



Fonte: Adaptado de Porciuncula, Segura e Laurindo (2016)

Aproximadamente 2000 g de bananas fatiadas foram colocadas sobre filmes plásticos (Lençol Armalon® *Standard*, Indaco, Brasil) (para evitar a adesão nas placas de aquecimento) e inseridas no interior da câmara de secagem sobre as placas aquecidas. A temperatura das placas foi mantida a 90 °C, assim como a temperatura da câmara. As amostras foram aquecidas até 60 °C antes da aplicação de um pulso de vácuo (25,5 mbar s⁻¹). A câmara de secagem foi mantida a 35 mbar por 5 min. Em seguida, a pressão atmosférica foi reestabelecida e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo aplicado. Quatro ciclos de aquecimento-pulso de vácuo foram aplicados, sendo que no último ciclo o vácuo foi mantido até que a temperatura do produto atingisse 83 °C. Em testes preliminares foi verificada que ao atingir esta temperatura as amostras estavam secas.

3.2.5 Acondicionamento das amostras

Amostras de banana desidratadas e torradas comerciais foram acondicionadas em ambiente de umidade relativa controlada a fim de homogeneizar a atividade de água dos produtos. O pacote de torradas foi aberto no momento do acondicionamento, os dois biscoitos do início e do final do pacote, respectivamente, foram descartados. Torradas e bananas desidratadas foram colocadas em copos plásticos perfurados e

aconditionadas em dessecador contendo solução salina saturada de cloreto de lítio ($a_w = 0,116$). Para garantir o estado de equilíbrio no dia do teste, três copos de bananas desidratadas e três copos contendo torradas foram utilizados como controle para obtenção da curva de evolução da massa com o tempo.

3.2.6 Validação do sistema/equipamento para medidas simultâneas acústicas e mecânicas

3.2.6.1 Testes mecânicos

Testes de perfuração foram realizados nas amostras por meio de um texturômetro com célula de carga de 25 kg (Stable Micro System, Modelo - TA-XT2-Plus, Reino Unido), utilizando uma sonda mecânica cilíndrica de 2 mm de diâmetro, velocidade de teste de 3 mm s^{-1} e deformação de 40 % da espessura inicial das amostras. A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 500 Hz, a mais alta disponibilizada pelo equipamento.

3.2.6.2 Medidas acústicas

As medidas acústicas foram realizadas com o sistema descrito no item 3.2.1. A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 51,2 kHz, possibilitando a investigação em todas as frequências audíveis ao ouvido humano (20 Hz a 20 kHz).

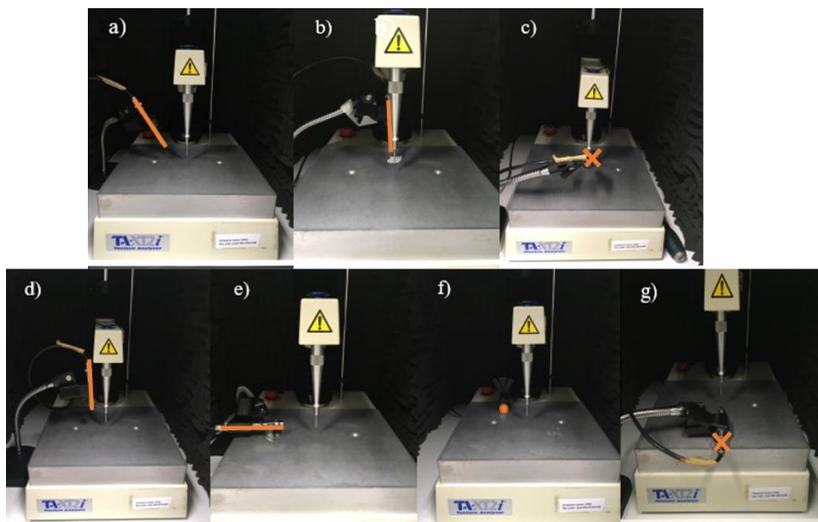
Os dados obtidos foram gravados e pós processados por códigos desenvolvidos no MATLAB (MathWorks Inc, EUA).

A aquisição simultânea das medidas acústicas e mecânicas foi realizada durante um intervalo de tempo de 15 s.

3.2.6.3 Determinação da posição do microfone

A determinação da posição do microfone foi realizada durante ensaios mecânicos e acústicos simultâneos utilizando sete posições diferentes do microfone em relação à sonda mecânica. Conforme representado na Figura 9 a distância da sonda do microfone à extremidade inferior da *probe* mecânica foi mantida em 5 cm, com variação nos ângulos e direções da membrana do microfone.

Figura 9: Posições do microfone em relação à *probe* mecânica. a) Posição 1, b) Posição 2, c) Posição 3, d) Posição 4, e) Posição 5, f) Posição 6, g) Posição 7



Fonte: o Autor

Nesta etapa foram utilizadas 3 amostras de bananas desidratadas e 3 amostras de torradas em cada posição. Para cada amostra o ensaio foi realizado em triplicata, totalizando 9 medições para banana e 9 medições para a torrada em cada posição.

3.2.7 Análise espectral

Os espectrogramas utilizados na análise de ruído de fundo foram gerados utilizando o *software* AtemiS SUITE (HEAD acoustics, Herzogenrath, Alemanha). Para a geração do espectrograma, o sinal foi separado em trechos utilizando a ferramenta de janelamento, *Hanning Window*. O tamanho da janela utilizada para aplicação da função FFT (*Fast Fourier Transform*) foi de 2048 amostras. Um *overlap* de 50% das amostras de trechos consecutivos foi utilizado para compensar o efeito do janelamento.

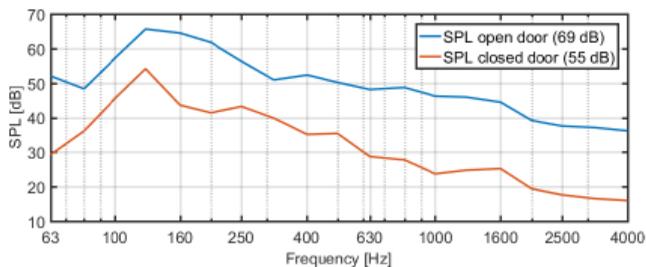
Os espectrogramas utilizados na análise da posição do microfone foram gerados a partir do *software* MATLAB (MathWorks Inc, USA). O sinal foi separado, por meio da ferramenta *Hanning Window*, em janelas de 4096 amostras, a função FFT foi aplicada sobre os dados. *Overlap* de 50% foi utilizado.

3.3 Resultados e Discussões

3.3.1 Determinação do ruído de fundo e aplicação de filtros digitais

A Figura 10 mostra o ruído do ambiente obtido com a porta da câmara semi-anecoica aberta (SPL *open door*) e fechada (SPL *closed door*).

Figura 10: Ruído de fundo medido com a porta da câmara semi-anecoica aberta e fechada.



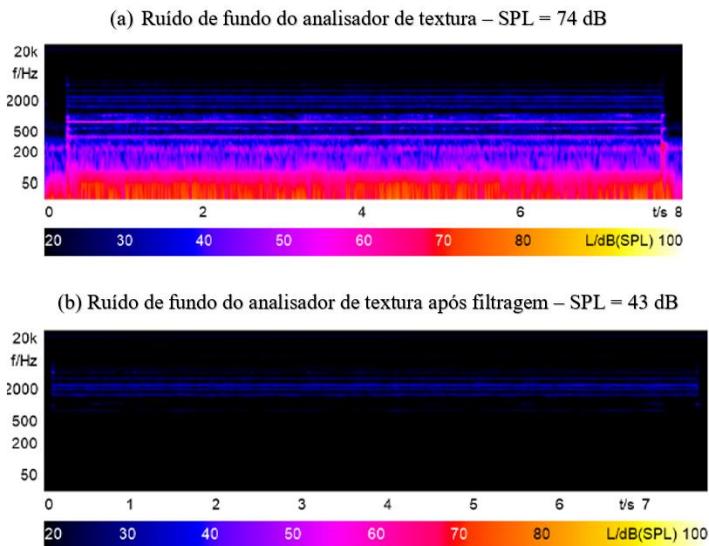
Nota: SPL fornecido na legenda é o SPL global (soma energética em todas as faixas de frequência) medidas com o sistema desenvolvido

Com a construção da câmara foi possível obter um isolamento de aproximadamente 14 dB de SPL em baixas frequências e aproximadamente 20 dB de SPL em frequências superiores a 1 kHz, demonstrando boa eficiência na atenuação do ruído ambiental.

A Figura 11 mostra as características de tempo-frequência obtidas a partir do ruído do texturômetro quando acionado. O espectrograma (a) mostra que o texturômetro produziu um ruído de fundo de aproximadamente 74 dB de SPL global quando acionado, pode ser verificada que a maior parte da energia acústica é encontrada em baixas frequências (abaixo de 1 kHz). O espectrograma (b) demonstra como ficam distribuídas as características de tempo-frequência quando o filtro Arimi, tipo passa alta, com frequência de corte de 1,5 kHz foi implementado. É possível verificar a eficácia do uso do filtro em suprimir o ruído do texturômetro. O ruído de fundo (ruído da sala + ruído do texturômetro) foi reduzido de um SPL global de 74 dB para 43 dB após a filtragem. Fica evidente, portanto, a necessidade da filtragem de ruídos no pós-processamento dos dados acústicos. Além disso, a contagem de picos acústicos deve ser realizada considerando o nível de pressão sonora

do ruído (ARIMI et al., 2010), ou seja, devem ser considerados picos acima de SPL global de 43 dB.

Figura 11: Comparação entre espectrogramas gerados a partir de (a) dados originais e (b) filtrados (filtro Arimi) para o ruído de fundo do texturômetro. NFFT: 2048, *overlap* 50%, *Hanning window*



3.3.2 Determinação da posição do microfone

Nas Figuras 12 e 13 são mostrados os espectrogramas das 7 posições de microfone avaliadas durante os testes de perfuração de banana desidratada e de torrada tradicional, respectivamente. A coloração amarelo-clara indica emissão acústica mais evidenciada.

As palavras *crispy* e *crunch* são utilizadas sem definições acordadas (KILCAST, 2004). Estudos indicam que os estímulos vibratórios podem levar à distinção de alimentos *crispy* e *crunch*. Produtos *crispy* apresentam fraturas repentinas e totais, maior número de picos acústicos e picos de maior intensidade do que produtos *crunch* (VICKERS, 1984). Alguns pesquisadores têm relatado que produtos crocantes (*crunch*) estão relacionados com emissões acústicas a frequências mais baixas durante a quebra, enquanto produtos crocantes (*crispy*) emitem sons com frequências mais altas (CHAUNIER et al., 2005; DACREMONT, 1995; SEYMOUR; HAMANN, 1988). A

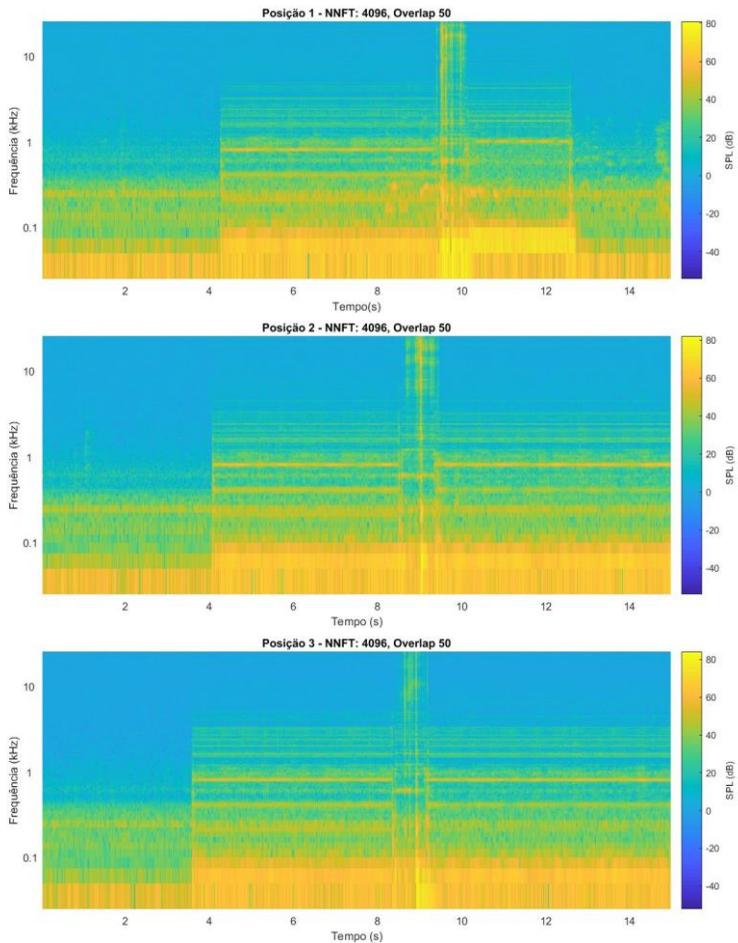
frequência a qual ocorre a emissão acústica durante a quebra varia de acordo com o produto, no entanto frequências acima de 1 kHz foram encontradas na literatura para produtos *crispy* (TUNICK et al., 2013). Sendo assim, serão considerados nos espectrogramas, emissões acústicas acima de 1 kHz como referentes à quebra dos produtos.

Nos testes de perfuração de bananas desidratadas (Figura 12), quando o microfone é posicionado nas posições 1 e 2 é perceptível a emissão acústica durante a perfuração da amostra pela *probe*. A emissão acústica pode ser visualizada pelas partes de coloração em amarelo e com frequência acima de 1 kHz dos espectrogramas. Com o microfone na posição 3, a coloração acima de 1 kHz fica mais esverdeada e a emissão acústica durante a análise mecânica é menos evidente. Com o microfone nas posições de 4 a 7 ainda é possível identificar emissões acústicas acima de 1 kHz, no entanto, os níveis de pressão sonora (SPL) são mais baixos nestas posições em comparação com as posições 1, 2 e 3. Os espectrogramas das posições do microfone de 4 a 7 indicam que ruídos com maior intensidade à baixas frequências, entre 40 e 60 dB de SPL, foram detectados durante todo o tempo de realização da análise. Estes ruídos foram provavelmente provocados pelo motor do texturômetro.

Para as amostras de torradas (Figura 13), as posições do microfone de 1, 2 e 3 indicaram boa visualização da emissão acústica causada pela perfuração do material. Assim como ficou evidenciado para as amostras de bananas, as posições de 4 a 7 apresentaram emissões acústicas com níveis de pressão sonora mais baixos durante o processo de perfuração. Ruídos de maior nível de pressão sonora também foram observados à baixas frequências durante toda a análise com o microfone nas posições de 4 a 7.

Ambas as posições do microfone, 1 e 2, podem ser utilizadas para análises futuras, esta observação é corroborada pelo trabalho de Chen, Karlsson e Povey (2005) que ao avaliar biscoitos crocantes verificou que para uma distância de 5 cm da sonda do microfone em relação ao ponto de quebra o melhor ângulo foi o de 45°. Nesta posição, o maior nível de pressão sonora também foi atingido durante o processo de quebra.

Figura 12: Espectrogramas gerados pela quebra da banana desidratada. Posições do microfone de 1 a 7. NFFT: 4096, *overlap* 50%, *Hanning window*



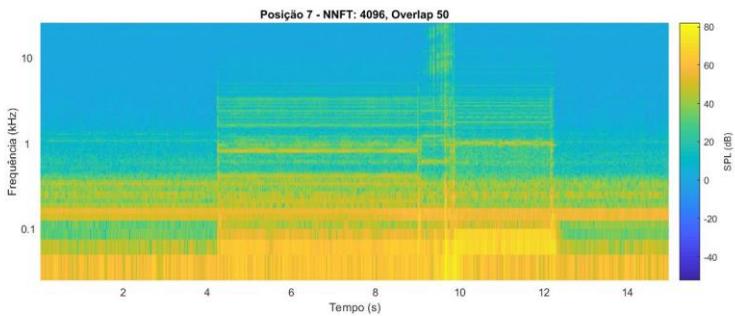
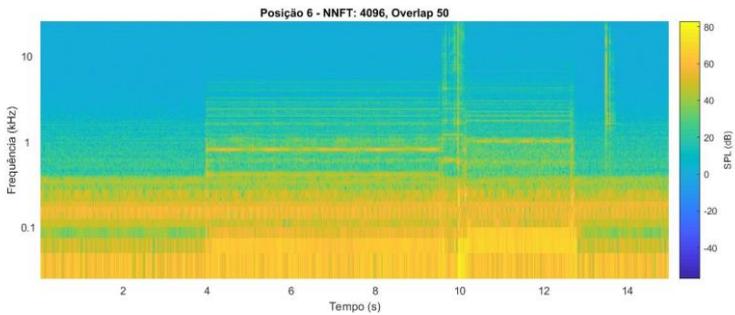
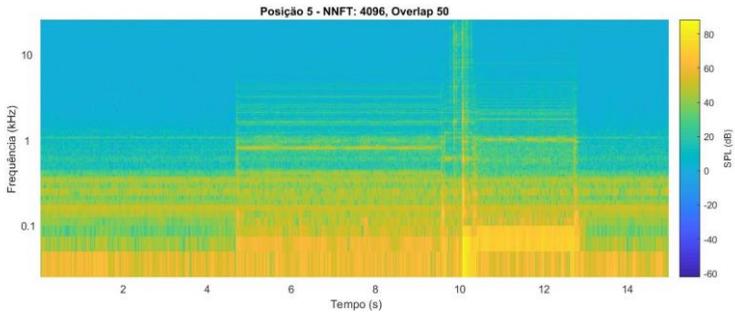
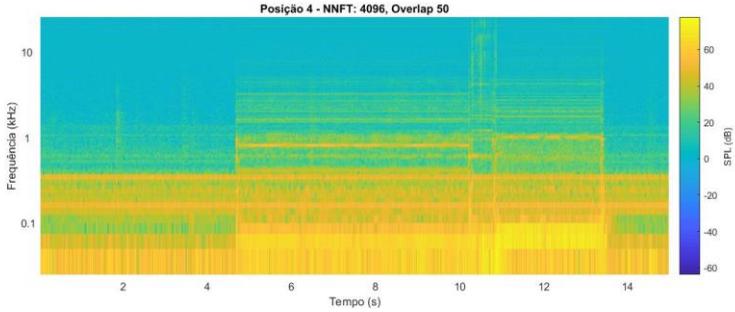
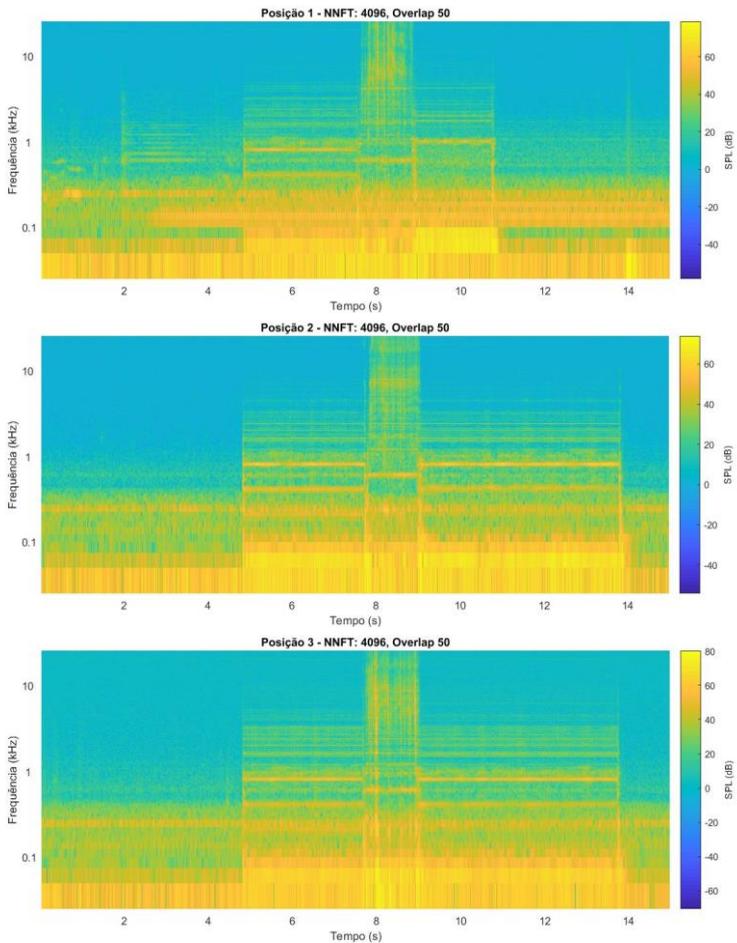
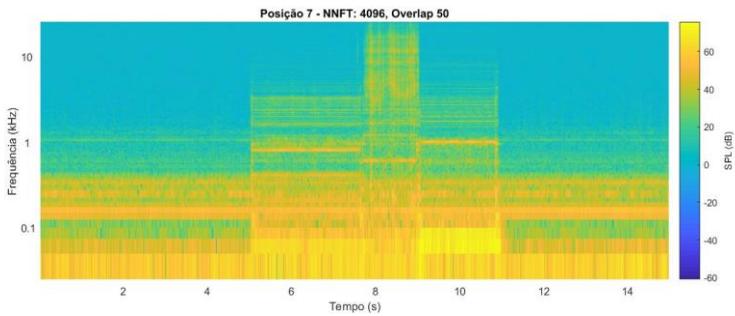
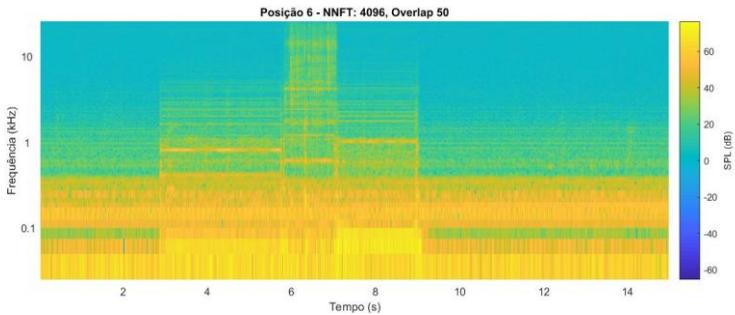
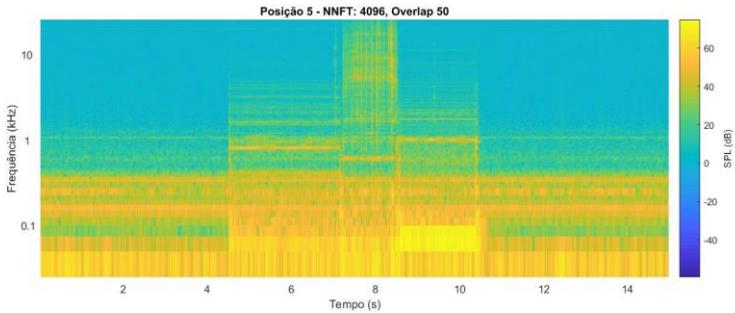
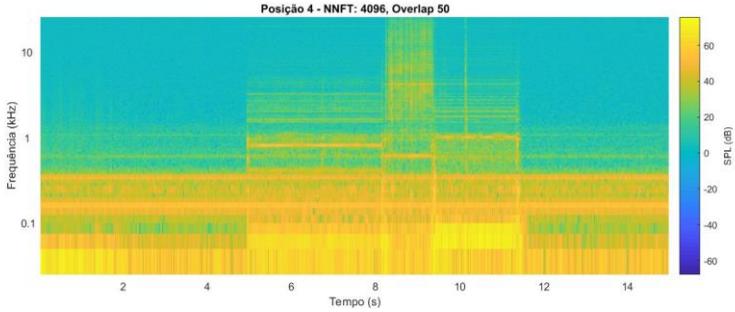


Figura 13: Espectrogramas gerados pela quebra da torrada. Posições do microfone de 1 a 7. NFFT: 4096, *overlap* 50%, *Hanning window*





3.4 Conclusões Parciais

Para possibilitar a realização de medidas acústicas e mecânicas simultaneamente, a fim de se determinar a crocância de alimentos, foi acoplado um sistema de medição acústico a um texturômetro. O sistema acústico utilizado possibilitou a utilização de uma taxa de amostragem (51,2 kHz) muito superior às obtidas pelo produto comercial de detecção acústica da *Stable Micro System*, o AED (0,5 kHz), assim possibilitando a investigação em todas as frequências audíveis ao ouvido humano.

A câmara semi-anecoica construída para isolar ruídos ambientais externos durante a realização das medições de crocância de alimentos se mostrou efetiva, desta forma, o ruído externo foi atenuado influenciando pouco os resultados acústicos obtidos. O ruído emitido pelo texturômetro durante a realização dos ensaios foi atenuado com a utilização de filtros digitais.

O ângulo de 45° com 5 cm de distância da sonda do microfone em relação à sonda do texturômetro ficou estabelecida como a melhor posição do microfone para a realização dos testes.

4. AVALIAÇÃO SIMULTÂNEA DE MEDIDAS ACÚSTICAS, MECÂNICAS E SENSORIAIS NA DETERMINAÇÃO DA CROCÂNCIA DOS PADRÕES DA ESCALA *SPECTRUM*

4.1 Introdução

A textura de um alimento é definida como todos os atributos reológicos e estruturais percebidos pelos receptores mecânicos, táteis, visuais e auditivos (ISO, 1981). Para perceber estes atributos são empregados os sentidos humanos da visão, tato e audição (LAWLESS; HEYMANN, 1998).

A emissão acústica é também um importante aspecto na percepção da textura de um alimento. A qualidade e a aceitabilidade de produtos alimentícios são, muitas vezes, baseadas nos sons produzidos durante o esmagamento ou na mordida dos alimentos. Por exemplo, para alimentos crocantes, quando não há emissão de som durante a mastigação, o alimento é normalmente considerado inaceitável ou de baixa qualidade (SZCZESNIAK, 1990).

As combinações de técnicas instrumentais com avaliações sensoriais podem aumentar a eficiência e a precisão na determinação da textura de alimentos (CHEN; OPARA, 2013). O método sensorial *Spectrum* é baseado no uso extensivo de pontos de referências, os quais, quando escolhidos de forma adequada, reduzem a variabilidade do painel, permitindo uma comparação de dados obtidos em tempos e com produtos diferentes. O método *Spectrum* possui escalas lineares para avaliar intensidades de compostos aromáticos comuns, sabor e textura. Dentro do atributo de textura uma escala de crocância foi desenvolvida (MEILGAARD; CIVILLE; CARR, 2007).

Diferentes produtos devem ser utilizados para familiarizar os painelistas com a definição de crocância. Amostras com baixa umidade, descritas na Tabela 2, podem ser utilizadas como padrões de amostras com diferentes níveis de crocância durante o treinamento do painel (KILCAST, 2004).

Tabela 2: Escala *Spectrum* de intensidade de crocância

Valor na Escala	Produto	Marca
3,0	Barra de Granola	Quaker Low Fat Chewy Chunk
5,0	Club Cracker	Keebler
6,5	Graham Cracker	Honey Maid
7,0	Cereal de Aveia	Cheerios
9,5	Bran Flakes	Kellogg's
14,0	Corn Flakes	Kellogg's
17,0	Melba Toast	Devobsheer

Fonte: Meilgaard, Civille e Carr (2007)

O objetivo deste estudo foi treinar um painel sensorial quanto ao atributo de crocância e avaliar a correlação da análise sensorial de textura de padrões utilizados na escala *Spectrum* com medidas acústicas e mecânicas, a fim de validar a utilização do dispositivo experimental desenvolvido na determinação da crocância de alimentos.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Matéria-prima

As amostras utilizadas para a realização do treinamento sensorial e dos testes foram adquiridas no mercado nacional e no exterior. Maiores informações sobre marcas e países de origem são reportadas nas Tabelas 3 e 5.

4.2.2 Determinação da umidade

A umidade (b.u.) das amostras foi determinada em triplicata pelo método gravimétrico, utilizando estufa a vácuo (TE-395, TECNAL, Piracicaba, Brasil) com pressão menor que 100 mmHg, à temperatura de 70 °C, conforme metodologia da AOAC (2005).

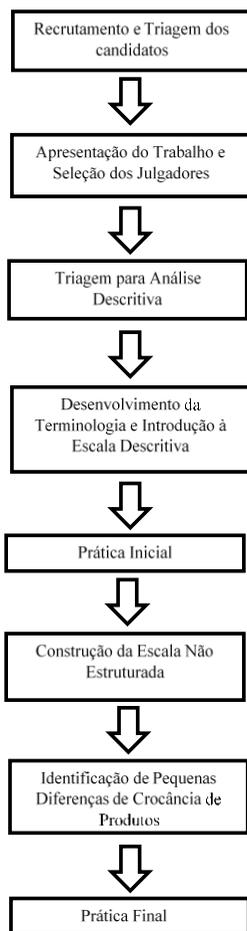
4.2.3 Atividade de água

A atividade de água das amostras foi determinada em higrômetro digital (Aqualab Modelo - Series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, EUA) pela medida do ponto de orvalho a 25 °C. As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.4 Treinamento sensorial

A análise sensorial foi realizada segundo metodologia citada por Meilgaard, Civille e Carr (2007), com algumas modificações. Essa análise descritiva quantitativa inclui a seleção e o treinamento de um grupo de pessoas, painel descritivo, o qual foi selecionado e treinado em relação ao atributo crocância. As etapas do treinamento estão descritas na Figura 14.

Figura 14: Fluxograma contendo as etapas de seleção e treinamento do painel descritivo



4.2.4.1 Recrutamento e triagem dos candidatos

Trinta e um voluntários dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina passaram por triagem fisiológica e psicológica para iniciar o treinamento em crocância. Nesta primeira etapa foi realizada a apresentação do trabalho e foi solicitado que os voluntários respondessem um questionário de pré-seleção via e-mail (APÊNDICE A).

Candidatos com problemas de saúde, os quais dificultam a percepção da textura dos alimentos, alergias, aqueles que utilizam próteses dentárias ou mesmo aqueles que não possuíam afinidade por alguns dos alimentos avaliados foram eliminados nessa triagem. Vinte e nove voluntários passaram para a próxima fase.

4.2.4.1.1 Apresentação do trabalho e seleção dos julgadores

Os objetivos do trabalho foram apresentados aos julgadores, bem como todas as etapas sensoriais que seriam executadas. Após esta apresentação realizou-se *in loco* uma revisão dos termos de textura, bem como a forma de mastigação e a identificação da crocância nos alimentos.

Após a revisão dos termos de textura, um questionário (APÊNDICE B) foi aplicado com o objetivo de eliminar candidatos que não apresentassem clareza das definições de textura que seriam úteis durante as etapas seguintes de análise sensorial. Participantes com 80% de acertos do questionário sobre textura foram selecionados para as demais etapas.

4.2.4.1.2 Teste de triagem para análise descritiva

O teste de triagem foi realizado utilizando-se produtos da escala *Spectrum* com diferentes intensidades de crocância e dureza. Foram selecionados cinco produtos de cada uma das escalas que representavam diferentes níveis de intensidade. Os produtos selecionados da escala de crocância foram os seguintes: Barra de Granola, *Club Cracker*, Cereal de Aveia, *Corn Flakes* e Torrada Tradicional. As marcas utilizadas estão descritas na Tabela 5. Os produtos e marcas utilizados para o teste de dureza estão apresentados na Tabela 3. Vinte e sete voluntários realizaram esta etapa. Os voluntários foram orientados em relação à técnica de mastigação adequada para diferenciar as intensidades de crocância e

dureza e a definição de cada um dos atributos. Esta etapa selecionou candidatos que diferenciavam intensidade de produtos duros e crocantes.

Tabela 3: Alimentos selecionados da escala de dureza para o teste de ordenação

Valor na Escala	Produto	Fabricante, País de Origem
1,0	Creme de Queijo	Philadelphia Light, Brasil
4,5	Queijo Processado	Polengui, Brasil
9,5	Amendoim Descascado e Salgado	Yoki, Brasil
11,0	Amêndoa	-
14,5	Bala Dura Hortelã	Dori, Brasil

As amostras foram apresentadas aos candidatos de forma aleatorizada, em copos plásticos identificados com 3 dígitos, e os candidatos foram instruídos a ordenar as amostras de menos crocante para mais crocante e de menos dura para mais dura. Candidatos que ordenaram corretamente 80% das amostras foram selecionados para as próximas etapas. A ficha do teste de ordenação pode ser encontrada no ANEXO A. Dezesete voluntários passaram para a fase de treinamento.

4.2.4.1.3 Desenvolvimento da terminologia e introdução à escala descritiva

Nesta etapa do treinamento os produtos da escala *Spectrum* de intensidade de crocância, descritos na Tabela 2, foram apresentados aos candidatos. Alguns produtos que não foram encontrados, mesmo em outros países, foram substituídos por outros de igual intensidade, conforme Tabela 5. As amostras foram apresentadas uma a uma aos candidatos para que eles pudessem avaliar e correlacionar cada item com a sua respectiva intensidade na escala de crocância.

4.2.4.1.4 Prática inicial

Amostras aleatorizadas da escala *Spectrum* (*Club Cracker*, Cereal de Aveia, *Corn Flakes* e *Torrada*) e amostras de *Doritos* (Pepsico, Brasil) foram fornecidas e identificadas com três dígitos para serem avaliadas na escala de intensidade. O candidato foi orientado a morder cada uma das

amostras e atribuir um valor de intensidade na escala de crocância estrutura de 17 pontos.

4.2.4.1.5 Construção da escala não estruturada

Uma escala descritiva não estruturada foi construída com os avaliadores a fim de minimizar a variabilidade de respostas. Para isso, os produtos da escala *Spectrum* foram apresentados aos provadores e os mesmos foram alocados na escala não estruturada de 15 pontos em consenso com os participantes do treinamento. Esta medida foi necessária porque os candidatos não concordaram com as intensidades de crocância propostas na escala *Spectrum*. Muñoz (1986) propôs o desenvolvimento de novas escalas de textura a partir das escalas propostas por Civille (1984) e obteve maior concordância e reprodutibilidade dos seus avaliadores com a nova escala construída.

A escala construída em consenso com os avaliadores está descrita na Tabela 5. Os avaliadores também atribuíram o zero da escala não-estruturada ao produto *Marshmallow* (Fini, Brasil).

4.2.4.1.6 Identificação de pequenas diferenças de crocância entre produtos

Amostras com níveis semelhantes de intensidade de crocância foram fornecidas aos pares aos candidatos para serem avaliadas na escala de intensidade. Além das amostras da escala *Spectrum* (*Barra de Granola*, *Club Cracker*, *Graham Cracker* e *Corn Flakes*) foram avaliadas também amostras de *Ricemallow* (Kellogg's, Brasil) e *Lays* (Pepsico, Brasil). Os pares de amostras avaliados em cada teste foram: *Ricemallow* e *Barra de Granola*; *Club Cracker* e *Graham Cracker*; *Corn Flakes* e *Lays*. O candidato foi instruído a morder cada amostra e atribuir uma intensidade na escala de crocância não estruturada de 15 pontos.

4.2.4.1.7 Prática final

De acordo com Meilgaard, Civille e Carr (2007) os produtos utilizados durante as etapas finais do treinamento devem se aproximar da situação de teste real para a qual o painel está sendo treinado, sendo assim, para a prática final foram fornecidas amostras aleatorizadas de torradas comerciais e bananas desidratadas (conforme descrito no item 3.2.4). As torradas (Bauducco, Guarulhos, Brasil) e as bananas da variedade Prata foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, Brasil) e

caracterizadas quanto à umidade e atividade de água conforme itens 4.2.2 e 4.2.3, respectivamente.

Ambas as amostras foram acondicionadas em dessecadores contendo soluções salinas saturadas por um período de 18 dias para obter diferentes níveis de crocância. Na Tabela 4 estão descritas as soluções salinas utilizadas.

Tabela 4: Soluções salinas saturadas utilizadas no acondicionamento de bananas desidratadas e torradas comerciais

Solução Salina Saturada	Atividade de Água (a_w)
Cloreto de Lítio	0,116
Acetato de Potássio	0,225
Cloreto de Magnésio	0,327
Carbonato de Potássio	0,438
Nitrato de Magnésio	0,529

Após o período de acondicionamento, o provador foi instruído a morder/mastigar as amostras com os molares e atribuir a intensidade de crocância na escala não estruturada de 15 pontos. No momento da avaliação foram fornecidos aos avaliadores os seguintes padrões da escala *Spectrum: Graham Cracker, All Bran Fruit and Fibre* e *Torrada Tradicional*, além do *Marshmallow* (zero da escala), a fim de ancorar algumas posições da escala e auxiliar na melhor avaliação dos produtos, visto que o painel é considerado semi-treinado.

4.2.5 Medidas acústicas e mecânicas

Medidas mecânicas foram realizadas em texturômetro TA-XT2-Plus (Stable Micro Systems, Godalming, UK) com célula de carga de 25 kg. O texturômetro foi colocado dentro de uma câmara com isolamento acústico (semi-anecoica) para evitar a influência dos efeitos ambientais de som. Dois testes mecânicos foram avaliados: compressão e perfuração. No ensaio de perfuração foi utilizada uma sonda cilíndrica P/2 (2 mm de diâmetro), uma unidade de produto foi avaliada por vez. No ensaio de compressão utilizou-se a sonda cilíndrica P/50 (50 mm de diâmetro), as quantidades/tamanhos de amostras utilizadas neste teste estão descritas na terceira coluna da Tabela 5, com exceção da torrada, que foi utilizado ¼ do tamanho da amostra. As condições de análise utilizadas para ambas as sondas foram: velocidade de teste de 3 mm s⁻¹ e deformação de 40% da amostra.

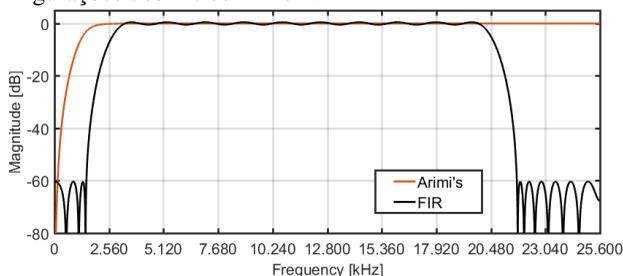
A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 500 Hz para o sinal de força. Todos os testes foram realizados em laboratório com temperatura controlada em $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uma macro foi utilizada para obter os dados de número de picos de força com *threshold* acima de 0,049 N, distância linear (comprimento de uma linha imaginária que une todos os pontos) e área (área sob a curva de força). Força máxima e força média foram obtidas no pós-processamento dos dados a partir das curvas de força *versus* deformação.

Medidas acústicas foram realizadas durante os ensaios mecânicos. O microfone GRAS (Holte, Dinamarca) foi posicionado a 5 cm de distância com um ângulo de 45° em relação à extremidade da sonda mecânica (posição 1 descrita no Capítulo 2). A taxa de aquisição dos dados acústicos foi de 51,2 kHz. O sinal do microfone captado foi enviado para o *software* MATLAB (MathWorks Inc, USA). A aquisição simultânea de força e som foi realizada durante 15 s. Todas as análises foram realizadas em 9 replicatas.

A contagem do número de picos acústicos foi implementada considerando o ruído de fundo após a filtragem. Somente picos com nível de pressão sonora acima de 50 dB SPL e com queda superior a 10 dB foram contabilizados (COSTA et al., 2011; JAKUBCZYK; GONDEK; TRYZNO, 2017; SALVADOR et al., 2009).

Dois filtros foram utilizados no pós-processamento dos dados, o filtro proposto por Arimi et al. (2010) com passa-alta de 1,5 kHz e o filtro FIR de passa-banda com 60 dB de atenuação. As configurações de cada um dos filtros utilizados são mostradas pela Figura 15. Para o filtro FIR as seguintes configurações foram utilizadas: frequência inferior de corte de banda de 1 kHz, frequência inferior de passa-banda de 3,125 kHz, frequência superior de corte de banda de 22 kHz e frequência superior de passa-banda de 20 kHz. Após a aplicação dos filtros, os seguintes dados acústicos foram obtidos: número de picos acústicos, nível máximo de pressão sonora ($\text{SPL}_{\text{MÁX}}$), nível médio de pressão sonora (SPL_{eq}) e nível de pressão sonora equivalente dos 10 maiores picos sonoros ($\text{SPL}_{\text{Máx},10}$).

Figura 15: Configurações dos filtros FIR e Ariml's



4.2.6 Análise estatística

Os resultados experimentais foram analisados estatisticamente com o programa Statistica 10.0 (StatSoft, Tulsa, EUA), através de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$).

O programa XLSTAT (Addinsoft, Paris, França) foi utilizado para realizar as análises de componentes principais e análises de correlações entre os parâmetros sensoriais e instrumentais. Para selecionar o número de fatores a ser considerado no PCA foi utilizado o critério de normalização de Kaiser (Equação 1.4), em conjunto com o critério da escolha de fatores que resultem em variância acumulada em torno de 70%. As correlações entre as variáveis foram consideradas significativas, ao nível de 0,05, quando maiores que 0,7.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Análise sensorial

Após a reestruturação da escala *Spectrum* os julgadores atribuíram valores distintos para os produtos avaliados conforme Tabela 5. Esta escala foi utilizada pelos painelistas durante todas as análises sensoriais seguintes.

Tabela 5: Escala de intensidade de crocância construída pelos painelistas

Produto Utilizado (Fabricante, País de Origem)	Valor Escala Painelistas	Quantidade/Tamanho
Barra de Granola (Quaker Chewy Chunk, EUA)	2,0	¼ barra
Club Cracker (Keebler, EUA)	3,6	1 unidade
Graham Cracker (Honey Maid, EUA)	5,7	¼ unidade
Cereal de Aveia (Cheerios, EUA)	6,5	4 unidades
All Bran Fruit and Fibre (Kellogg's, França)	9,5	4 unidades
Corn Flakes (Kellogg's, Brasil)	13,7	4 unidades
Torrada (Bauducco, Brasil)	15,0	½ torrada

4.3.2 Análise das propriedades físicas, mecânicas e acústicas

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das propriedades físicas (a_w e umidade) e mecânicas (número de picos de força, força máxima, força média, área e distância linear) tanto para o teste de compressão como para o teste de perfuração.

A atividade de água das amostras variou de 0,236 a 0,522 e a umidade em base úmida (b.u.) de 3,67% a 6,15%, sendo que, os maiores valores de ambas as análises corresponderam às amostras de *Corn Flakes*. Sauvageot e Blond (1991) encontraram o valor de 6% para a umidade de amostras de *Corn Flakes*, os autores também encontraram o valor de atividade de água até o qual o produto permanece sensorialmente crocante, de aproximadamente 0,58.

As propriedades mecânicas mostraram, como esperado, que os testes de compressão e perfuração apresentam diferenças nos parâmetros avaliados.

Durante os ensaios de perfuração, o número de picos de força não apresentou diferenças significativas entre as amostras de *All Bran Fruit and Fibre* e *Corn Flakes*, e entre as amostras de *Graham Cracker* e Cereal de Aveia. O valor de número de picos de força apresentado pela Barra de Granola foi estatisticamente igual ao valor apresentado pelas amostras de *Club Cracker*, *All Bran Fruit and Fibre* e *Corn Flakes*.

No teste de compressão, o número de picos de força foi capaz de diferenciar estatisticamente três grupos de produtos da escala *Spectrum*. O primeiro grupo foi composto pelas amostras de Barra de Granola e *Club Cracker*, o segundo pelas amostras de *Graham Cracker*, Cereal de Aveia, *All Bran Fruit and Fibre* e *Corn Flakes* e o terceiro grupo foi composto apenas pela amostra de Torrada. O aumento do número de picos de força é frequentemente relacionado com o aumento da crocância do produto (ÇARŞANBA; DUERRSCHMID; SCHLEINING, 2017; DOGAN; KOKINI, 2006; SAELEAW; DÜRRSCHMID; SCHLEINING, 2012; SALVADOR et al., 2009). A amostra de Torrada, estatisticamente diferentes das demais amostras de produtos testados, apresentou o maior valor de número de picos de força em ambos os ensaios mecânicos, indicando ser o produto avaliado mais crocante.

No ensaio de perfuração, os maiores valores de força máxima e força média foram obtidos durante o teste do *All Bran Fruit and Fibre* e os menores, durante a perfuração do *Corn Flakes*. Esta última afirmação corrobora com o estudo de Chaunier et al. (2005), que verificaram que a crocância do *Corn Flakes* é inversamente proporcional ao aumento da força máxima. Nos testes de compressão, os maiores valores de força máxima e força média foram obtidos durante a compressão da Torrada e os menores, durante os testes de *All Bran Fruit and Fibre* e *Corn Flakes*. A força máxima possui relação com a dureza do produto (Chanvrier et al., 2014). No entanto, este parâmetro apresentou comportamento distinto para a amostra de *All Bran Fruit and Fibre* nos testes de compressão e perfuração. Quando cereais foram avaliados pelo teste de compressão, 4 unidades dos mesmos foram comprimidos ao mesmo tempo. Enquanto nos testes de perfuração as análises foram realizadas pontualmente no produto, este pode ser um dos fatores que tenha levado a resultados tão distintos para o mesmo produto.

Em ambos os ensaios, compressão e perfuração, a amostra de Barra de Granola apresentou o maior valor de área, também chamado de trabalho de compressão. Jakubczyk, Gondek e Tryzno (2017) verificaram em seu estudo sobre crocância de *snacks* extrusados que durante os testes de perfuração, os valores de área foram inversamente proporcionais aos valores de número de picos de força. No entanto, no teste de compressão, a amostra de Torrada apresentou o segundo parâmetro (área) mais alto, indicando que, para este tipo de teste mecânico essa afirmação não foi válida.

A distância linear, em ambos os testes, apresentou o maior valor para a amostra de Torrada e o menor, para a amostra de *Corn Flakes*. Segundo Varela et al. (2006) este parâmetro é uma linha imaginária que

une todos os pontos de uma determinada região, sendo que, uma linha altamente irregular, devido a muitos eventos de fratura, tem um comprimento muito maior do que uma linha suave resultante do teste de um produto "soft". Na avaliação do *Corn Flakes*, não foi possível relacionar o aumento da distância linear com as variações na escala de crocância sensorial.

Na Tabela 7 estão descritos os dados acústicos para os testes de compressão e perfuração com a utilização de dois filtros acústicos, FIR e Arimi.

Os filtros acústicos tiveram desempenhos parecidos tanto no teste de compressão quanto no teste de perfuração. O parâmetro número de picos acústicos indicou que a Torrada foi a amostra mais crocante, enquanto a Barra de Granola foi a menos crocante. Os resultados das demais amostras indicam que para este parâmetro, o método não conseguiu diferenciar as amostras intermediárias da escala de crocância *Spectrum*, apenas os extremos. Estudos indicam a relação entre o aumento da crocância do produto e o aumento do parâmetro número de picos acústicos (ARIMI et al., 2010; BLONSKA; MARZEC; BLASZCZYK, 2014; CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; JAKUBCZYK; GONDEK; TRYZNO, 2017; PRIMO-MARTÍN et al., 2008, 2009; VARELA et al., 2008).

Em ambos os testes mecânicos, compressão e perfuração e com a utilização de ambos os filtros acústicos, Arimi e FIR, os maiores valores encontrados para os parâmetros $SPL_{MÁX}$, SPL_{eq} e $SPL_{Máx,10}$ foram relativos à amostra de *Corn Flakes* e os menores, à amostra de Barra de Granola. A associação de parâmetros acústicos como, SPL_{eq} $SPL_{MÁX}$ e máxima pressão sonora com o aumento do número de picos acústicos e, consequentemente, com a crocância de produtos industrializados foi encontrada em estudos realizados com diferentes produtos como: *wafers* (ÇARŞANBA; DUERRSCHMID; SCHLEINING, 2017), biscoitos (ARIMI et al. 2010; CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005), cereais extrusados (CHANVRIER et al., 2014) e batata chips (SALVADOR et al., 2009; TANIWAKI; KOHYAMA, 2012). Os resultados do teste de perfuração mostraram um comportamento diferente para os cereais *All Bran Fruit and Fibre* e *Corn Flakes*, que embora possuam valores altos de $SPL_{MÁX}$, SPL_{eq} e $SPL_{Máx,10}$, apresentaram valores baixos para o parâmetro número de picos acústico, indicando que a perfuração não é o teste mecânico mais adequado para analisar as propriedades de textura deste tipo de produto.

Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas dos padrões de crocância da escala *Spectrum*

	Barra de Granola	Club Cracker	Graham Cracker	Cereal de Aveia	All Bran Fruit and Fibre	Corn Flakes	Torrada
Propriedades Físicas							
Atividade de água	0,442 ± 0,003 ^{abc}	0,347 ± 0,005 ^{cd}	0,254 ± 0,009 ^d	0,236 ± 0,029 ^d	0,429 ± 0,106 ^{ab}	0,522 ± 0,027 ^a	0,386 ± 0,011 ^{bc}
Umidade (%)	5,52 ± 0,21 ^b	5,64 ± 0,07 ^{ab}	3,67 ± 0,06 ^d	3,93 ± 0,15 ^{cd}	4,18 ± 0,38 ^c	6,15 ± 0,04 ^a	3,97 ± 0,12 ^{cd}
Propriedades Mecânicas – Teste de Perfuração							
Número de Picos de Força	7 ± 3 ^{cd}	9 ± 2 ^c	16 ± 2 ^b	13 ± 2 ^b	5 ± 1 ^d	5 ± 2 ^d	26 ± 3 ^a
Força Máxima (N)	8,08 ± 1,57 ^{ab}	5,62 ± 1,08 ^b	7,13 ± 0,42 ^{ab}	8,35 ± 1,59 ^{ab}	13,57 ± 10,07 ^a	4,48 ± 2,97 ^b	8,87 ± 4,57 ^{ab}
Força Média (N)	4,47 ± 1,13 ^a	3,05 ± 0,44 ^{ab}	3,71 ± 0,67 ^{ab}	3,88 ± 0,68 ^{ab}	4,92 ± 4,05 ^a	1,33 ± 1,23 ^b	3,70 ± 0,67 ^{ab}
Área (N.s)	8,09 ± 2,01 ^a	2,07 ± 0,27 ^{bcd}	3,31 ± 0,54 ^b	2,82 ± 0,53 ^b	1,35 ± 0,98 ^{cd}	0,57 ± 0,41 ^d	3,41 ± 2,49 ^b
Distância Linear	20,95 ± 4,86 ^{bc}	16,02 ± 1,97 ^{bc}	31,10 ± 0,54 ^{bc}	32,74 ± 6,63 ^{bc}	38,56 ± 28,71 ^b	12,79 ± 6,86 ^c	65,69 ± 26,30 ^a
Propriedades Mecânicas – Teste de Compressão							
Número de Picos de Força	2 ± 1 ^c	7 ± 2 ^c	13 ± 3 ^b	14 ± 5 ^b	15 ± 3 ^b	16 ± 5 ^b	22 ± 6 ^a
Força Máxima (N)	125,25 ± 35,26 ^{bc}	92,24 ± 15,79 ^c	177,03 ± 28,76 ^{ab}	110,58 ± 63,58 ^{bc}	15,57 ± 7,26 ^d	7,78 ± 5,12 ^d	191,90 ± 83,04 ^a
Força Média (N)	54,48 ± 16,75 ^b	39,97 ± 7,73 ^b	71,09 ± 18,41 ^{ab}	47,92 ± 34,33 ^b	4,07 ± 1,40 ^c	2,29 ± 1,50 ^c	104,57 ± 48,70 ^a
Área (N.s)	318,81 ± 97,76 ^a	29,15 ± 4,60 ^c	68,55 ± 15,46 ^c	40,84 ± 25,36 ^c	3,60 ± 1,19 ^c	2,64 ± 1,67 ^c	139,85 ± 63,80 ^b
Distância Linear	134,84 ± 36,47 ^{cd}	115,92 ± 19,07 ^{cde}	233,48 ± 37,95 ^b	195,80 ± 81,00 ^{bc}	60,66 ± 16,39 ^{de}	48,48 ± 26,90 ^c	509,44 ± 113,93 ^a

Nota: Os dados em cada linha com letras diferentes são significativamente diferentes ($p < 0,05$). Os dados são apresentados como média ± desvio padrão

Tabela 7: Parâmetros acústicos para os padrões da escala *Spectrum* utilizando os filtros FIR e Arimi

Parâmetro	Barra de Granola	Club Cracker	Graham Cracker	Cereal de Aveia	All Bran Fruit and Fibre	Corn Flakes	Torrada
Propriedades Acústicas – Teste de Perfuração (filtro FIR)							
Número de Picos Acústicos	17 ± 6 ^c	2633 ± 394 ^{bc}	3004 ± 757 ^b	2521 ± 573 ^{bc}	1501 ± 381 ^d	1984 ± 567 ^{cd}	6047 ± 977 ^a
SPL _{eq} (dB)	51,61 ± 0,31 ^e	58,35 ± 1,21 ^d	58,99 ± 1,68 ^d	58,15 ± 1,77 ^d	66,97 ± 3,17 ^b	73,30 ± 2,62 ^a	63,10 ± 2,31 ^c
SPL _{MAX} (dB)	55,02 ± 2,74 ^d	83,71 ± 5,68 ^c	86,59 ± 5,69 ^c	84,28 ± 5,40 ^c	96,57 ± 7,39 ^b	109,25 ± 6,97 ^a	98,69 ± 6,85 ^b
SPL _{Máx,10} (dB)	52,34 ± 0,83 ^d	79,36 ± 4,47 ^c	82,97 ± 3,69 ^c	79,10 ± 4,95 ^c	91,23 ± 6,90 ^b	104,12 ± 5,35 ^a	93,09 ± 5,15 ^b
Propriedades Acústicas – Teste de Perfuração (filtro Arimi)							
Número de Picos Acústicos	527 ± 78 ^e	3629 ± 356 ^c	4628 ± 563 ^b	4248 ± 852 ^{bc}	2195 ± 412 ^d	2469 ± 558 ^d	8430 ± 915 ^a
SPL _{eq} (dB)	51,56 ± 0,54 ^e	57,43 ± 1,11 ^d	57,39 ± 0,84 ^d	56,88 ± 1,61 ^d	65,13 ± 2,87 ^b	71,90 ± 2,27 ^a	61,61 ± 2,30 ^c
SPL _{MAX} (dB)	62,12 ± 3,64 ^d	84,79 ± 5,57 ^c	87,31 ± 5,11 ^c	86,25 ± 6,00 ^c	98,79 ± 6,39 ^b	110,64 ± 5,65 ^a	99,61 ± 6,36 ^b
SPL _{Máx,10} (dB)	58,61 ± 3,08 ^d	80,21 ± 4,13 ^c	83,51 ± 3,46 ^c	80,93 ± 5,20 ^c	92,71 ± 6,05 ^b	104,97 ± 4,96 ^a	93,65 ± 5,00 ^b
Propriedades Acústicas – Teste de Compressão (filtro FIR)							
Número de Picos Acústicos	403 ± 244 ^d	5975 ± 145 ^c	7933 ± 410 ^b	7750 ± 644 ^b	6331 ± 1123 ^c	8040 ± 1605 ^b	11917 ± 675 ^a
SPL _{eq} (dB)	54,10 ± 0,79 ^d	66,99 ± 0,88 ^c	68,10 ± 1,23 ^c	68,70 ± 4,07 ^{bc}	71,12 ± 2,20 ^b	74,34 ± 2,05 ^a	75,30 ± 1,09 ^a
SPL _{MAX} (dB)	67,38 ± 2,89 ^c	101,84 ± 3,69 ^b	98,33 ± 5,19 ^b	102,12 ± 5,80 ^b	103,54 ± 3,74 ^b	109,28 ± 1,76 ^a	100,01 ± 3,01 ^b
SPL _{Máx,10} (dB)	64,06 ± 2,66 ^d	96,59 ± 2,80 ^{bc}	92,75 ± 3,29 ^c	97,25 ± 4,16 ^{bc}	99,49 ± 2,65 ^b	105,98 ± 1,92 ^a	97,10 ± 2,52 ^b
Propriedades Acústicas – Teste de Compressão (filtro Arimi)							
Número de Picos Acústicos	1767 ± 479 ^e	7482 ± 277 ^d	9432 ± 365 ^{bc}	9623 ± 819 ^{bc}	8457 ± 1571 ^{cd}	9934 ± 1653 ^b	13857 ± 764 ^a
SPL _{eq} (dB)	52,24 ± 0,42 ^d	66,13 ± 0,91 ^c	67,50 ± 1,32 ^{bc}	67,89 ± 4,05 ^{bc}	69,63 ± 2,41 ^b	73,07 ± 2,22 ^a	74,76 ± 1,04 ^a
SPL _{MAX} (dB)	68,27 ± 3,23 ^d	102,30 ± 3,63 ^{bc}	98,36 ± 5,13 ^c	102,42 ± 5,29 ^{bc}	104,12 ± 3,35 ^{ab}	109,47 ± 1,79 ^a	100,13 ± 3,41 ^{bc}
SPL _{Máx,10} (dB)	65,09 ± 2,72 ^d	97,20 ± 2,93 ^{bc}	93,12 ± 3,71 ^c	97,63 ± 4,19 ^{bc}	99,99 ± 2,58 ^b	106,15 ± 1,97 ^a	97,45 ± 2,58 ^{bc}

Nota: Os dados em cada linha com letras diferentes são significativamente diferentes ($p < 0.05$). Os dados são apresentados como média ± desvio padrão

4.3.3 Análises das curvas de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo

Na Figura 16 são apresentadas curvas de força *versus* tempo sincronizadas com as curvas de SPL *versus* tempo para três produtos (Barra de Granola, *Graham Cracker* e Torrada) diferentes da escala de crocância *Spectrum*. No APÊNDICE E encontram-se duas replicatas das curvas para cada um dos três padrões da escala *Spectrum* citados acima. As curvas (a), (b) e (c) foram obtidas a partir dos testes de compressão e as curvas (d), (e) e (f) foram obtidas a partir dos testes de perfuração, ambas utilizando o filtro acústico FIR.

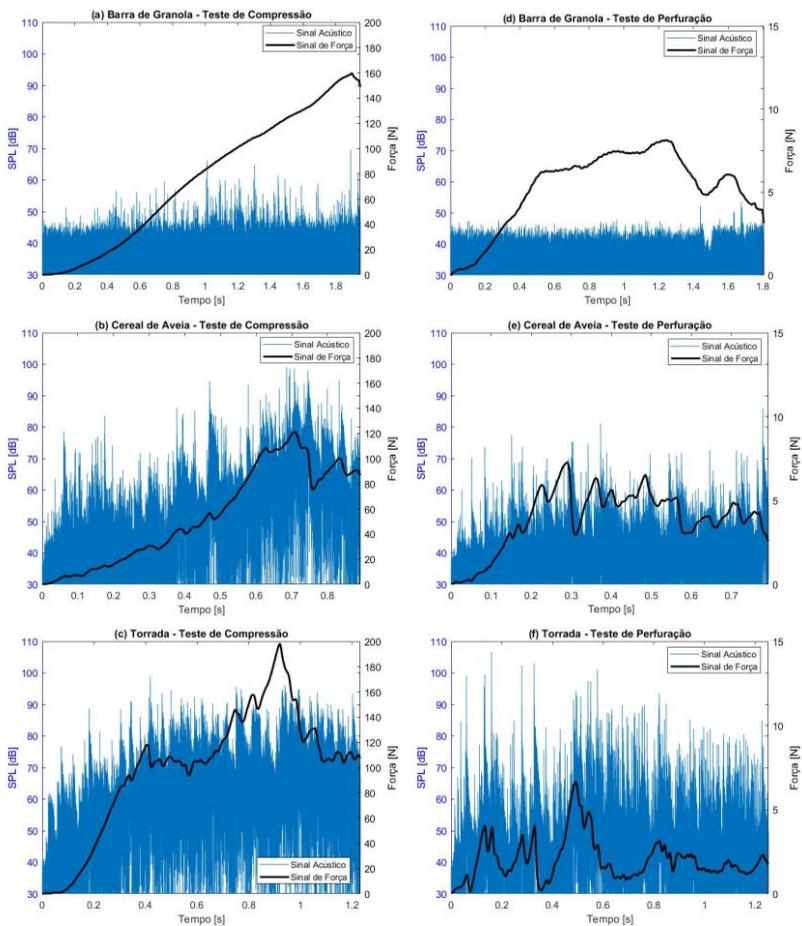
Durante a compressão de todos os produtos, picos de força apresentam valores acima de 100 N, enquanto na perfuração este valor é inferior a 10 N. Mais picos de força foram observados durante os testes de perfuração, por outro lado, mais picos acústicos foram observados durante os testes de compressão. O $SPL_{MÁX}$ apresentou valores superiores nos testes de compressão.

Pode ser observado que nem sempre um evento acústico aparece diretamente relacionado com uma queda de força. Chen, Karlsson e Povey (2005) explicaram que o número de picos de som e o número de picos de força não precisam se correlacionar um a um, uma vez que a emissão acústica é o resultado de uma súbita liberação de energia, enquanto a curva de força é o resultado da energia aplicada ou liberada pela amostra.

Vários sinais acústicos foram detectados durante todos os testes, enquanto o número de picos de força foi muito menor. Chen, Karlsson e Povey (2005) e Piazza et al. (2006) em seus estudos de medidas simultâneas mecânicas e acústicas relataram que o número de eventos de fratura foi frequentemente menor que o número de eventos acústicos. Chen, Karlsson e Povey (2005) justificaram que isto pode ocorrer devido à baixa taxa de aquisição de dados mecânicos (500 Hz).

Em ambos os testes mecânicos é possível supor, com base nos gráficos, que a amostra de Barra de Granola não apresenta curvas de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo características de produtos crocantes. Nas curvas do Cereal de Aveia são observados mais picos acústicos e mecânicos, indicando um produto mais crocante e por fim, ainda mais picos são observados nas curvas da amostra de Torrada, exibindo um gráfico típico de produto crocante.

Figura 16: Curvas força *versus* tempo e SPL *versus* tempo durante a compressão da (a) Barra de Granola, (b) Cereal de Aveia e (c) Torrada e durante a perfuração (d) Barra de Granola, (e) Cereal de Aveia e (f) Torrada



4.3.4 Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de compressão utilizando o filtro FIR

A matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de compressão utilizando o filtro acústico FIR, apresentada na Tabela 8, indica que existem correlações significativas entre as propriedades mecânicas, acústicas e sensoriais. A adequação da análise fatorial foi verificada por meio do teste de KMO, que resultou no valor de 0,735, confirmando que análise fatorial se aplica na avaliação dos parâmetros.

Tabela 8: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de compressão utilizando o filtro acústico FIR

	Atividade de Água	Unidade	Nº de Picos	Área	Distância Linear	Força Máxima	Força Média	Nº de Picos Acústicos	SPL _{eq}	SPL _{MAX}	SPL _{MAX,10}	Escala <i>Spectrum</i>	Escala Painelistas
Atividade de Água	1												
Unidade	0,679	1											
Nº Picos Força	-0,005	-0,414	1										
Área	0,094	0,081	-0,478	1									
Distância Linear	-0,319	-0,535	0,337	0,827	1								
Força Máxima	-0,521	-0,456	-0,116	0,555	0,827	1							
Força Média	-0,412	-0,423	-0,050	0,544	0,891	0,972	1						
Nº Picos Acústicos	-0,192	-0,444	0,829	-0,483	0,575	0,198	0,278	1					
SPL _{eq}	0,051	-0,251	0,756	-0,677	0,283	-0,119	-0,024	0,870	1				
SPL _{MAX}	-0,061	-0,158	0,601	-0,837	-0,012	-0,293	-0,245	0,735	0,870	1			
SPL _{MAX,10}	-0,006	-0,123	0,620	-0,833	0,007	-0,302	-0,239	0,756	0,909	0,987	1		
Escala <i>Spectrum</i>	0,358	-0,144	0,784	-0,302	0,461	-0,030	0,112	0,798	0,817	0,559	0,619	1	
Escala Painelistas	0,392	-0,134	0,788	-0,360	0,365	-0,122	0,016	0,772	0,831	0,596	0,656	0,991	1

Nota: As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem > 0,7 (números em negrito)

A partir da confirmação da adequação dos dados foi realizada a análise fatorial de componentes principais. A Tabela 9 mostra os autovalores obtidos. Na escolha do número de fatores foram considerados os autovalores maiores que 1 (critério de Normalização de Kaiser) e como o número de componentes foi inferior a 20, utilizou-se em conjunto, o critério da escolha de fatores que resultem em variância acumulada em torno de 70%. Desta forma, os dois primeiros fatores foram considerados na análise de componentes principais.

Tabela 9: Interpretação dos fatores para o teste de compressão – filtro acústico FIR

Fator	Autovalor	%Variância	%Variância Acumulada
1	6,25	48,10	48,10
2	3,85	29,63	77,73
3	1,76	13,50	91,22
4	0,67	5,16	96,38
5	0,21	1,60	97,99
6	0,10	0,73	98,72
7	0,05	0,37	99,09
8	0,04	0,31	99,40
9	0,04	0,28	99,67
10	0,02	0,18	99,85
11	0,01	0,10	99,95
12	0,01	0,04	99,99
13	0,00	0,01	100,00

Na Tabela 10 estão descritos os componentes principais obtidos por meio do PCA. Os dois primeiros componentes principais explicam juntos 77,73% da variância total dos dados. O primeiro componente, que explica 48,1% da variância dos dados, é fortemente influenciado pelos parâmetros: número de picos de força, número de picos acústicos, $SPL_{MÁX}$, SPL_{eq} , $SPL_{Máx,10}$ e pelas duas escalas de crocância. O primeiro componente pode ser definido como crocância sensorial. O segundo componente, que explica 29,63% da variância, é fortemente influenciado apenas por parâmetros mecânicos, tais como: distância linear, força máxima e força média.

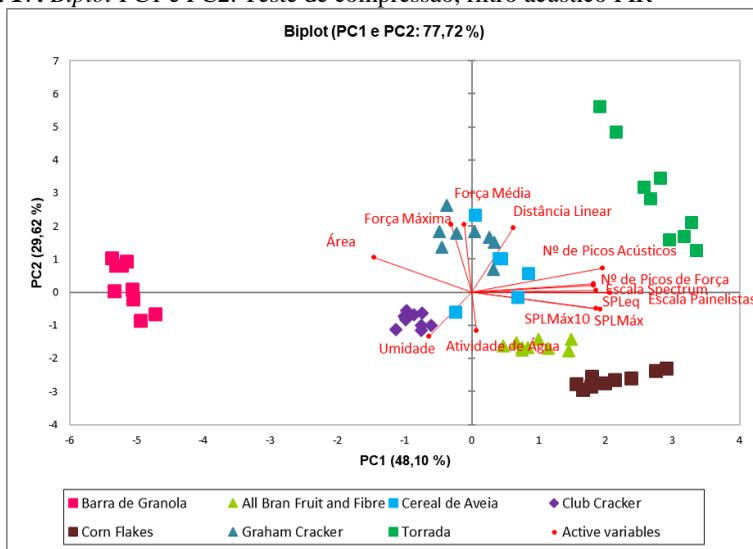
Tabela 10: Análise de componentes principais para o teste de compressão utilizando o filtro acústico FIR

	PC1 (48,10%)	PC2 (29,63%)
Atividade de Água	0,036	-0,549
Umidade	-0,300	-0,633
Nº de Picos de Força	0,858	0,095
Área	-0,684	0,492
Distância Linear	0,295	0,914
Força Máxima	-0,145	0,955
Força Média	-0,051	0,954
Nº de Picos Acústicos	0,917	0,337
SPL _{eq}	0,969	-0,007
SPL _{MÁX}	0,873	-0,236
SPL _{Máx,10}	0,901	-0,238
Escala <i>Spectrum</i>	0,857	0,115
Escala Painelistas	0,871	0,025

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

A Figura 17 apresenta o *Biplot* dos dois primeiros componentes principais para os testes de compressão dos padrões da escala *Spectrum* (filtro acústico FIR). Como o PC1 está relacionado com a crocância do produto, é possível afirmar que a amostra de Torrada é a amostra mais crocante, seguida da amostra de *Corn Flakes*. A amostra de Barra de Granola é claramente a menos crocante. De uma maneira geral os padrões intermediários das escalas sensoriais estão misturados no gráfico, indicando que os mesmos não foram diferenciados pelos métodos combinados.

Figura 17: *Biplot* PC1 e PC2. Teste de compressão, filtro acústico FIR



Com base na Tabela 8 e na Figura 17 é possível verificar que a a_w e a umidade não possuem correlações superiores a 0,7 com as propriedades acústicas, mecânicas e sensoriais. No entanto, muitas correlações superiores a 0,7 foram verificadas entre parâmetros instrumentais e entre parâmetros instrumentais e sensoriais.

Fortes correlações foram verificadas entre os parâmetros mecânicos: força máxima e distância linear ($r = 0,827$) e força média e distância linear ($r = 0,891$) e entre todos os parâmetros acústicos avaliados, como por exemplo, número de picos acústicos e SPL_{eq} ($r = 0,870$), número de picos acústicos e $SPL_{Máx}$ ($r = 0,735$) e número de picos acústicos e $SPL_{Máx,10}$ ($r = 0,756$). As relações entre as propriedades acústicas que quantificam picos de fratura e pressão sonora máxima emitida foram verificadas em muitas pesquisadas já realizadas (ARIMI et al., 2010; ÇARŞANBA; DUERRSCHMID; SCHLEINING, 2017; CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005)

Parâmetros acústicos e mecânicos também demonstraram fortes correlações entre si, tais como, número de picos acústicos e número de picos de força ($r = 0,829$) e número de picos de força e SPL_{eq} ($r = 0,756$). Çarşanba, Duerrschmid e Schleining (2017) e Saeleaw e Schleining (2011) também encontraram correlações altas entre número de picos acústicos e número de picos de força para amostras de *wafers* e biscoitos de mandioca, respectivamente. Salvador et al. (2009) verificaram que

para batata chips altos valores de número de picos de força estavam associados a altos valores de picos acústicos e $SPL_{Máx,10}$, os autores também verificaram associações entre estas variáveis e a crocância sensorial. No entanto, alguns dos parâmetros avaliados mostraram correlações negativas, ou seja, o aumento de um deles levou à diminuição do outro, foram eles: área e $SPL_{MÁX}$ ($r = -0,837$) e área e $SPL_{Máx,10}$ ($r = -0,833$).

As escalas sensoriais apresentaram correlações acima de 0,77 com os seguintes parâmetros instrumentais acústicos e mecânicos: nº de picos de força, nº de picos acústicos e SPL_{eq} . Com bases nestes dados, e pela Figura 17, é possível afirmar que a crocância sensorial dos produtos avaliados pode ser estimada por meio dos parâmetros acima citados.

4.3.5 Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de compressão utilizando o filtro acústico Arimi

A matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de compressão utilizando o filtro acústico Arimi, apresentada na Tabela 11, indica que existem correlações entre as propriedades mecânicas, acústicas e sensoriais, durante os ensaios de compressão das amostras da escala *Spectrum*. A análise KMO resultou no valor de 0,747, confirmando que análise fatorial se aplica na avaliação dos parâmetros.

Tabela 11: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de compressão utilizando o filtro acústico Arimi

	Atividade de Água	Umidade	Nº Picos	Força	Área	Distância Linear	Força Máxima	Força Média	Nº de Picos Acústicos	SPL _{eq}	SPL _{Max}	SPL _{Max,10}	Escala <i>Spectrum</i>	Escala Painelistas
Atividade de Água	1													
Umidade	0,679	1												
Nº Picos	-0,005	-0,414	1											
Força	0,094	0,081	-0,478	1										
Área	-0,319	-0,535	0,335	0,337	1									
Distância Linear	-0,521	-0,456	-0,116	0,555	0,827	1								
Força Máxima	-0,412	-0,423	-0,050	0,544	0,891	0,972	1							
Força Média	-0,162	-0,442	0,837	-0,302	0,528	0,137	0,223	1						
Nº Picos Acústicos	0,008	-0,274	0,745	-0,659	0,322	-0,065	0,024	0,886	1					
SPL _{eq}	-0,055	-0,132	0,592	- 0,841	-0,023	-0,302	-0,243	0,734	0,870	1				
SPL _{Max}	-0,005	-0,120	0,631	- 0,834	0,005	-0,303	-0,236	0,758	0,905	0,991	1			
SPL _{Max,10}	0,358	-0,144	0,784	-0,302	0,461	-0,030	0,112	0,809	0,808	0,808	0,555	0,614	1	
Escala <i>Spectrum</i>	0,392	-0,134	0,788	-0,360	0,365	-0,122	0,016	0,789	0,819	0,819	0,593	0,651	0,991	1
Escala Painelistas														

Nota: As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem > 0,7 (números em negrito)

A Tabela 12 mostra os autovalores obtidos a partir da análise fatorial dos componentes principais. Considerando-se o critério de Normalização de Kaiser, em conjunto com o critério da variância acumulada em torno de 70%, os dois primeiros fatores foram considerados na análise de componentes principais.

Tabela 12: Interpretação dos fatores para o teste de compressão – filtro acústico Arimi

Fator	Autovalor	%Variância	%Variância Acumulada
1	6,26	48,12	48,12
2	3,83	29,44	77,56
3	1,76	13,50	91,06
4	0,68	5,24	96,30
5	0,20	1,53	97,83
6	0,10	0,74	98,57
7	0,06	0,44	99,01
8	0,04	0,31	99,31
9	0,04	0,29	99,60
10	0,04	0,28	99,88
11	0,01	0,08	99,96
12	0,00	0,03	99,99
13	0,00	0,01	100,00

Na Tabela 13 estão descritos os componentes principais obtidos por meio do PCA. Os dois primeiros componentes principais explicam juntos 77,56% da variância total dos dados. O primeiro componente, que explica 48,12% da variância, é fortemente influenciado pelos parâmetros: número de picos de força, número de picos acústicos, $SPL_{MÁX}$, SPL_{eq} , $SPL_{Máx,10}$ e ambas as escalas sensoriais. O segundo componente, que explica 29,44% da variância, é fortemente influenciado apenas por parâmetros mecânicos, tais como: distância linear, força máxima e força média.

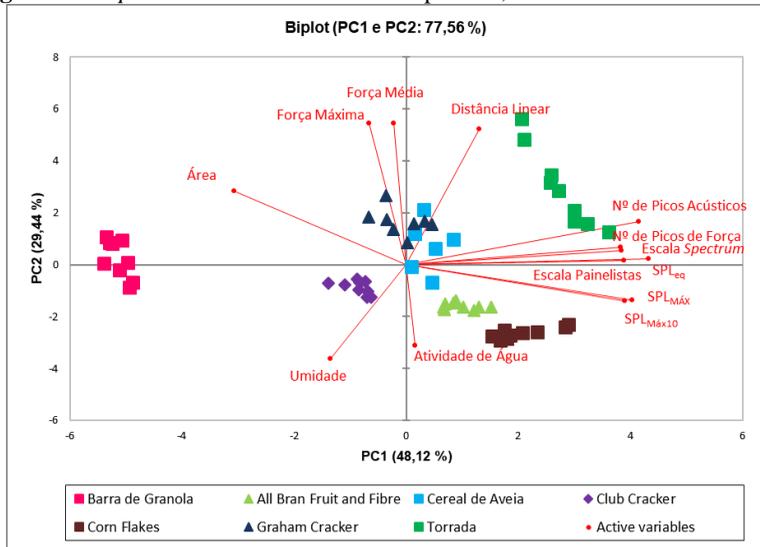
Tabela 13: Análise de componentes principais para o teste de compressão utilizando o filtro acústico Arimi

	PC1 (48,12%)	PC2 (29,44%)
Atividade de Água	0,035	-0,547
Umidade	-0,303	-0,636
Nº de Picos de Força	0,857	0,095
Área	-0,685	0,494
Distância Linear	0,292	0,914
Força Máxima	-0,147	0,954
Força Média	-0,051	0,953
Nº de Picos Acústicos	0,926	0,290
SPL _{eq}	0,966	0,041
SPL _{MÁX}	0,871	-0,245
SPL _{Máx,10}	0,901	-0,240
Escala <i>Spectrum</i>	0,856	0,118
Escala Painelistas	0,870	0,028

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

A Figura 18 apresenta o *Biplot* dos dois primeiros componentes principais para o teste de compressão, utilizando o filtro acústico Arimi. A Tabela 11 e a Figura 18 mostram que os parâmetros e amostras que influenciam cada componente principal avaliado, bem como os fatores de correlação entre as variáveis, foram iguais, ou muito parecidos, com os obtidos por meio do filtro acústico FIR. Desta forma, é possível afirmar que no teste de compressão dos produtos da escala *Spectrum*, ambos os filtros podem ser utilizados no pós-processamento dos parâmetros acústicos.

Figura 18: *Biplot* PC1 e PC2. Teste de compressão, filtro acústico Arimi



4.3.6 Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro FIR

A matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico FIR, apresentada na Tabela 14, indica que existem correlações significativas entre as propriedades mecânicas, acústicas e sensoriais durante os ensaios de perfuração das amostras da escala *Spectrum*. A análise KMO resultou no valor de 0,671. A análise fatorial pode ser realizada, mas é necessário ressaltar que o grau de adequação da amostra é baixo.

Tabela 14: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico FIR

	Atividade de Água	Umidade	Nº de Picos de Força	Área	Distância Linear	Força Máxima	Força Média	Nº de Picos Acústicos	SPL _{eq}	SPL _{MAX}	SPL _{MAX10}	Escala <i>Spectrum</i>	Escala <i>Spectrum</i>	Escala <i>Spectrum</i>
Atividade de Água	1													
Umidade	0,678	1												
Nº Picos Força	-0,419	-0,581	1											
Área	-0,082	-0,016	0,116	1										
Distância Linear	-0,163	-0,566	0,578	0,260	1									
Força Máxima	-0,030	-0,331	-0,004	0,267	0,702	1								
Força Média	-0,188	-0,260	-0,091	0,506	0,543	0,896	1							
Nº Picos Acústicos	-0,259	-0,445	0,864	-0,209	0,556	-0,036	-0,197	1						
SPL _{eq}	0,522	0,170	-0,159	-0,691	0,003	-0,030	-0,304	0,179	1					
SPL _{MAX}	0,241	-0,058	0,109	-0,745	0,125	-0,084	-0,360	0,442	0,911	1				
SPL _{MAX10}	0,253	-0,046	0,112	-0,757	0,121	-0,080	-0,355	0,453	0,929	0,992	1			
Escala <i>Spectrum</i>	0,378	-0,126	0,452	-0,422	0,429	0,015	-0,320	0,660	0,710	0,767	0,774	1		
Escala <i>Spectrum</i>	0,410	-0,118	0,358	-0,473	0,388	0,035	-0,307	0,581	0,776	0,804	0,812	0,990	1	

Nota: As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem > 0,7 (números em negrito)

A Tabela 15 mostra os autovalores obtidos a partir da análise fatorial dos componentes principais. Considerando-se o critério de Normalização de Kaiser, em conjunto com o critério da variância acumulada em torno de 70%, os dois primeiros fatores foram considerados na análise de componentes principais.

Tabela 15: Interpretação dos fatores para o teste de perfuração – filtro acústico FIR

Fator	Autovalor	%Variância	%Variância Acumulada
1	5,55	42,69	42,69
2	3,51	27,01	69,70
3	2,01	15,47	85,18
4	1,15	8,87	94,05
5	0,31	2,40	96,45
6	0,21	1,62	98,07
7	0,09	0,66	98,73
8	0,07	0,51	99,24
9	0,05	0,38	99,62
10	0,03	0,20	99,83
11	0,02	0,15	99,97
12	0,00	0,02	99,99
13	0,00	0,01	100,00

Na Tabela 16 estão descritos os componentes principais obtidos por meio do PCA. Os dois primeiros componentes principais explicam juntos 69,7% da variância total dos dados. O PC1, que explica 42,69% da variância, é fortemente influenciado pelos parâmetros: $SPL_{MÁX}$, SPL_{eq} , $SPL_{Máx,10}$ e ambas as escalas sensoriais. O segundo componente, que explica 27,01% da variância dos dados, é fortemente influenciado pelos parâmetros mecânicos, número de picos força e distância linear e pela umidade.

Tabela 16: Análise de componentes principais para o teste de perfuração utilizando o filtro acústico FIR

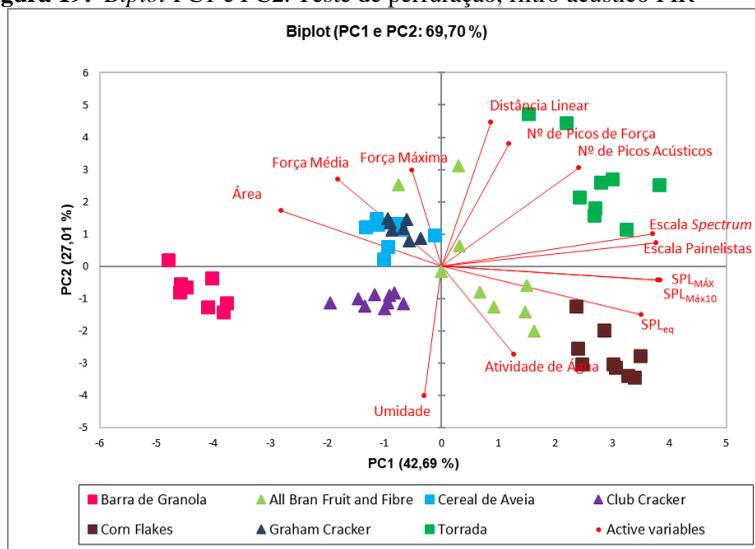
	PC1 (42,69%)	PC2 (27,01%)
Atividade de Água	0,315	-0,540
Umidade	-0,076	-0,791
Nº de Picos de Força	0,292	0,745
Área	-0,697	0,340
Distância Linear	0,213	0,879
Força Máxima	-0,128	0,585
Força Média	-0,451	0,532
Nº de Picos Acústicos	0,596	0,602
SPL _{eq}	0,868	-0,296
SPL _{MÁX}	0,941	-0,083
SPL _{Máx,10}	0,949	-0,087
Escala <i>Spectrum</i>	0,919	0,199
Escala Painelistas	0,933	0,142

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

Com base na Tabela 14 é possível afirmar que não foram encontradas correlações superiores a 0,7 entre a_w e umidade e as propriedades acústicas, mecânicas e sensoriais. No entanto, correlações superiores a 0,7 foram verificadas entre parâmetros instrumentais e sensoriais.

Na Figura 19 está apresentado o *Biplot* dos dois primeiros componentes principais para os testes de perfuração dos padrões da escala *Spectrum* (filtro acústico FIR).

Figura 19: *Biplot* PC1 e PC2. Teste de perfuração, filtro acústico FIR



Fortes correlações foram verificadas entre os parâmetros mecânicos: força máxima e distância linear ($r = 0,702$) e força média e força máxima ($r = 0,896$). Jakubczyk, Gondek e Tryzno (2017) e Saeleaw, Dürschmid e Schleining (2012) encontraram fortes correlações entre parâmetros de força e dureza sensorial. Sendo assim, em testes de perfuração, a distância linear indica estar associada à dureza do produto.

Todos os parâmetros acústicos relacionados com nível de pressão sonora emitido durante o ensaio (SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$ e $SPL_{MÁX,10}$) apresentaram coeficientes de correlação acima de 0,9 entre si.

Poucos parâmetros acústicos e mecânicos demonstraram fortes correlações entre si. Número de picos acústicos e número de picos de força ($r = 0,864$) apresentaram correlações positivas, como tem sido observado em muitos estudos recentes de correlações entre variáveis acústicas e mecânica na determinação da crocância de alimentos (ÇARŞANBA; DUERRSCHMID; SCHLEINING, 2017; SAELEAW; SCHLEINING, 2011; SALVADOR et al., 2009). Alguns dos parâmetros avaliados mostraram correlações negativas, ou seja, o aumento de um deles levou à diminuição do outro, foram eles: área e $SPL_{MÁX}$ ($r = -0,745$) e área e $SPL_{MÁX,10}$ ($r = -0,757$), indicando que o trabalho de compressão foi inversamente proporcional aos diferentes parâmetros relacionados com a intensidade sonora.

As escalas sensoriais apenas apresentaram correlações acima de 0,7 com parâmetros acústicos relacionados ao nível de intensidade sonora, tais como: SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$ e $SPL_{Máx,10}$.

Produtos crocantes são caracterizados por apresentar eventos de fratura associados a eventos acústicos durante o processo de quebra. No entanto, com bases nos dados acima discutidos e pela análise da Figura 19, é possível afirmar que durante testes de perfuração, a crocância sensorial dos produtos da escala *Spectrum* pode ser estimada apenas por meio de propriedades acústicas, que neste caso estão relacionadas com nível de pressão sonora e não com eventos de fratura, como frequentemente ocorre. Não foram observadas correlações significativas entre a crocância sensorial e as propriedades mecânicas.

Analisando o *Biplot* (Figura 19) é possível observar como o PC1 é o componente relacionado à crocância sensorial do produto, é possível afirmar que as amostras mais crocantes são àquelas localizadas à direita do gráfico, *Torrada*, *Corn Flakes* e *All Bran Fruit and Fibre*. Enquanto a amostra de Barra de Granola é a menos crocante. Os padrões intermediários apresentaram crocâncias muito semelhantes entre si. As amostras de produtos que estão localizadas na parte negativa do PC2 possuem maior umidade e menor dureza, comparativamente às amostras que estão localizadas na parte positiva do PC2.

4.3.7 Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro Arimi

A matriz de correlação de Pearson, dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico Arimi, Tabela 17, indica que existem poucas correlações significativas entre as propriedades mecânicas, acústicas e sensoriais durante os ensaios de perfuração das amostras da escala *Spectrum*. O pós-processamento dos dados foi realizado utilizando o filtro acústico Arimi. A análise KMO resultou no valor de 0,652. A análise fatorial pode ser realizada, mas novamente é necessário ressaltar que o grau de adequação da amostra é baixo.

Tabela 17: Matriz de correlação de Pearson dos padrões da escala *Spectrum* para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico Arimi

	Atividade de Água	Umidade	Nº de Picos de Força	Área	Distância Linear	Força Máxima	Força Média	Nº de Picos Acústicos	SPL _{eq}	SPL _{MAX}	SPL _{Máx.10}	Escala Spectrum	Escala Palmelistas
Atividade de Água	1												
Umidade	0,676	1											
Nº Picos Força	-0,420	-0,584	1										
Área	-0,104	-0,041	0,121	1									
Distância Linear	-0,164	-0,570	0,578	0,266	1								
Força Máxima	-0,031	-0,334	-0,004	0,272	0,702	1							
Força Média	-0,193	-0,268	-0,091	0,508	0,544	0,696	1						
Nº Picos Acústicos	-0,361	-0,533	0,920	-0,116	0,601	-0,019	-0,158	1					
SPL _{eq}	0,593	0,249	-0,181	-0,658	-0,018	-0,039	-0,305	0,035	1				
SPL _{MAX}	0,337	0,001	0,073	-0,705	0,130	-0,063	-0,341	0,306	0,905	1			
SPL _{Máx.10}	0,340	0,012	0,082	-0,722	0,115	-0,077	-0,355	0,315	0,929	0,989	1		
Escala Spectrum	0,400	-0,110	0,457	-0,400	0,436	0,016	-0,316	0,597	0,696	0,772	0,776	1	
Escala Palmelistas	0,441	-0,096	0,359	-0,450	0,393	0,038	-0,302	0,509	0,766	0,814	0,819	0,990	1

Nota: As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem > 0,7 (números em negrito)

A Tabela 18 mostra os autovalores obtidos a partir da análise fatorial dos componentes principais. Apenas os dois primeiros fatores foram considerados na análise de componentes principais.

Tabela 18: Interpretação dos fatores para o teste de perfuração – filtro acústico Arimi

Fator	Autovalor	%Variância	%Variância Acumulada
1	5,42	41,70	41,70
2	3,67	28,21	69,91
3	2,09	16,04	85,96
4	1,09	8,36	94,31
5	0,28	2,14	96,45
6	0,22	1,71	98,16
7	0,09	0,68	98,84
8	0,06	0,44	99,28
9	0,04	0,30	99,58
10	0,03	0,26	99,83
11	0,02	0,14	99,97
12	0,00	0,02	99,99
13	0,00	0,01	100,00

Na Tabela 19 estão mostrados os dois componentes principais considerados que juntos explicam 69,91% da variância total dos dados. Assim como no teste de perfuração utilizando o filtro FIR, o PC1 possui influência de variáveis como: $SPL_{MÁX}$, SPL_{eq} , $SPL_{Máx,10}$ e ambas as escalas sensoriais. Já o PC2 é fortemente influenciado pelas propriedades mecânicas, número de picos de força, número de picos acústicos e distância linear e negativamente influenciado pela umidade.

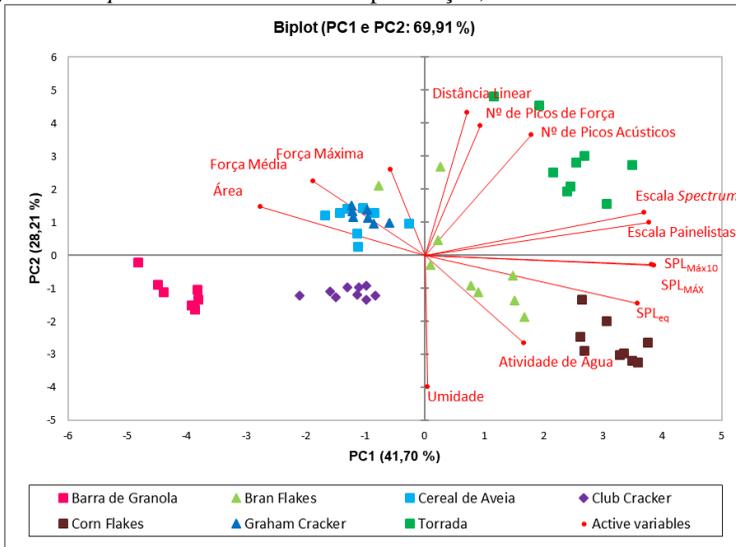
Tabela 19: Análise de componentes principais para o teste de perfuração usando o filtro acústico Arimi

	PC1 (41,70%)	PC2 (28,21%)
Atividade de Água	0,413	-0,542
Umidade	0,011	-0,808
Nº de Picos de Força	0,232	0,793
Área	-0,681	0,297
Distância Linear	0,175	0,875
Força Máxima	-0,140	0,527
Força Média	-0,463	0,457
Nº de Picos Acústicos	0,443	0,741
SPL _{eq}	0,882	-0,294
SPL _{MÁX}	0,942	-0,055
SPL _{Máx,10}	0,952	-0,064
Escala <i>Spectrum</i>	0,912	0,264
Escala Painelistas	0,933	0,199

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

Na Figura 20 está apresentado o *Biplot* dos dois primeiros componentes principais para o teste de perfuração dos padrões da escala *Spectrum*, usando o filtro acústico Arimi.

Figura 20: Biplot PC1 e PC2. Teste de perfuração, filtro acústico Arimi



A Tabela 17 e a Figura 20 indicam que, assim como ocorreu no teste de compressão, o tipo de filtro influenciou muito pouco nas correlações entre as variáveis e no comportamento dos parâmetros e das amostras frente os componentes principais obtidos. A maior diferença encontrada foi que utilizando o filtro Arimi o parâmetro SPL_{eq} não apresentou correlação significativa com a escala sensorial *Spectrum*, embora tenha apresentado com a escala dos painelistas. Sendo assim, no teste de perfuração dos produtos da escala *Spectrum*, ambos os filtros podem ser utilizados no pós-processamento dos parâmetros acústicos.

4.4 Conclusões Parciais

Os testes de compressão e perfuração apresentaram consideráveis diferenças entre si, as quais devem ser consideradas para cada tipo de produto e/ou pela forma como a análise sensorial será conduzida.

A partir da análise de componentes principais a porcentagem de variância explicada pelos testes de compressão e perfuração, foi cerca de 77% e 70%, respectivamente. Portanto o teste de compressão demonstrou ser o mais indicado para os produtos testados da escala de crocância *Spectrum*.

Para o teste de compressão, o parâmetro mecânico (número de picos de força) e os parâmetros acústicos (número de picos acústicos e

SPL_{eq}) apresentaram correlações acima de 0,77 com as duas escalas sensoriais utilizadas. Os filtros acústicos testados mostraram as mesmas tendências nos resultados e podem ser aplicados no pós-processamento dos dados sem grandes diferenças nos resultados obtidos.

A aplicação das medidas de força *versus* deslocamento em conjunto com o sistema acústico desenvolvido é uma técnica eficaz na determinação da textura de produtos crocantes, no entanto, o PCA indicou que o método não foi capaz de diferenciar as amostras intermediárias da escala de crocância, apenas os extremos. A escala de crocância *Spectrum* é composta por produtos muito diferentes entre si (composição, textura, espessura, umidade), a variabilidade de tantas características ao mesmo tempo dificulta a percepção da crocância por meio de medidas acústicas e mecânicas, que quantificam parâmetros específicos, mas não são capazes de detectar propriedades sensoriais multimodais da mesma forma que os seres humanos percebem. Porém, a grande maioria das vezes, a indústria alimentícia está interessada em determinar a crocância de amostras do mesmo tipo de produto, a fim de detectar possíveis alterações de processo e formulação, desta forma é possível que o método se aplique melhor em perceber tais diferenças e fornecer respostas tão satisfatórias quanto às obtidas por meio de um painel sensorial.

5. MEDIDAS ACÚSTICAS, MECÂNICAS E SENSORIAIS DE BANANAS DESIDRATADAS PELO MÉTODO KMFD COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PROCESSO

5.1 Introdução

Atualmente, consumidores têm desejado adquirir alimentos saudáveis, de baixo custo e sensorialmente diferenciados. Nesse contexto, fatias de frutas liofilizadas consumidas como *snacks* se destacam, no entanto, esse processo possui alto custo e o preço final desse produto é bastante elevado. A secagem por KMFD (*conductive multi-flash drying*) foi desenvolvida para resolver os inconvenientes de processos longos e onerosos, como a liofilização, mantendo algumas das características dos produtos liofilizados e melhorando atributos sensoriais dos produtos finais, como a crocância. Dessa maneira, as frutas e hortaliças desidratadas através desta técnica apresentam baixo teor de umidade e atividade de água, textura crocante e alta taxa de reidratação (LAURINDO; PORCIUNCULA; ZOTARELLI, 2011; ZOTARELLI; PORCIUNCULA; LAURINDO, 2012).

A utilização de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CMFD) durante o processo de secagem foi relatada por Zotarelli, Porciuncula e Laurindo (2012) que obtiveram, ao término do processo, mangas e bananas desidratadas e crocantes similares às obtidas pelo processo de liofilização.

Neste tipo de processo, a fruta é aquecida à pressão atmosférica até uma temperatura pré-definida e uma queda de pressão é realizada (pulso de vácuo), o que causa a evaporação da água, com conseqüente resfriamento do produto. O aquecimento pode ser realizado através de diferentes formas, radiação, micro-ondas, convecção ou condução (LAURINDO; PORCIUNCULA; ZOTARELLI, 2011)

Porciuncula, Segura e Laurindo (2016) estudaram a utilização da técnica de KMFD para desidratar fatias de bananas, utilizando como fonte de calor placas aquecidas no interior de uma estufa com temperatura controlada de 80°C. Ao término do processo foram obtidas amostras com alta porosidade, estrutura aberta devido ao efeito *Puffing*, causado pelos sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, e produtos com alta crocância.

Link, Tribuzi e Laurindo (2017b) utilizaram a técnica de KMFD para desidratar fatias de manga testando diferentes condições de processo (número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, taxas de descompressão e a utilização dos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo

seguido de secagem a vácuo) e indicaram que os produtos apresentam diferentes propriedades dependendo dos parâmetros de processo utilizados. A crocância das frutas nesses trabalhos foi avaliada a partir de análises mecânicas, as quais podem ser simplistas para explicar esse parâmetro sensorial.

O objetivo desta etapa do trabalho foi avaliar a crocância de amostras de bananas desidratadas pelo método KMFD, variando algumas condições de processo (número de pulsos e temperatura). A crocância das amostras foi avaliada por medidas acústicas, mecânicas e sensoriais. As correlações entre estas medidas foram possibilitadas por meio da matriz de correlação e da análise de componentes principais.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Matéria-prima

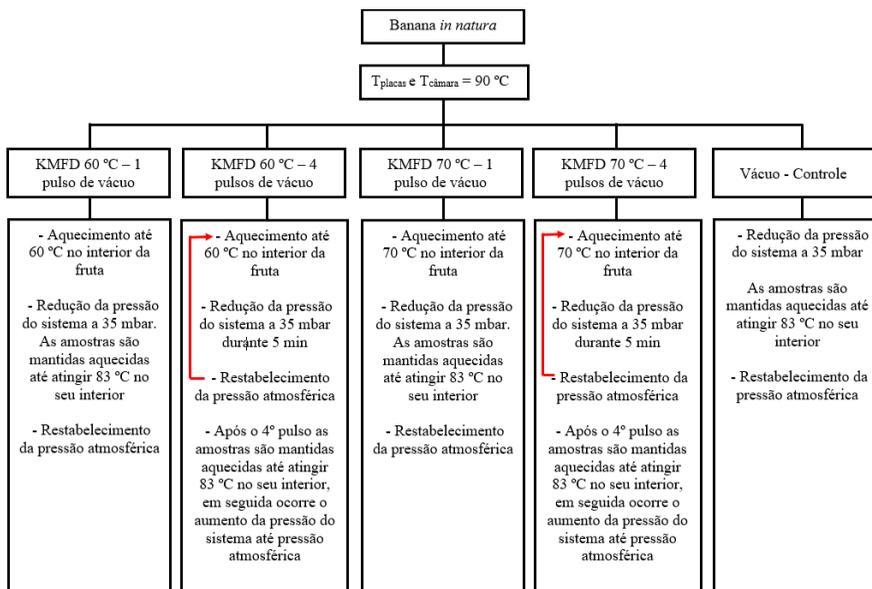
As bananas da variedade Prata foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, Brasil). As frutas foram selecionadas pelo grau de maturação, determinado pela análise visual e conteúdo de sólidos solúveis (SST) (usando um refratômetro óptico Pocket refractometer Atago, Modelo-PAL-BX/RI, Japão). As frutas foram descascadas e fatiadas com uma espessura de 5 mm.

5.2.2 Secagem da banana

Aproximadamente 2000 g de bananas fatiadas foram colocadas sobre filmes plásticos (Lençol Armalon® Standard) para evitar a adesão nas placas de aquecimento e inseridas no interior da câmara de secagem sobre as placas aquecidas conforme aparato experimental descrito no item 3.2.4. A temperatura das placas foi mantida a 90°C, assim como a temperatura da câmara.

Diferentes condições de processo foram utilizadas para obter bananas com diferentes texturas pelo método KMFD, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21: Resumo das condições de processo utilizadas durante os experimentos de secagem por KMFD



5.2.3 Caracterização das amostras

5.2.3.1 Determinação da umidade

A umidade (b.u.) das amostras foi determinada conforme descrito no item 4.2.2.

5.2.3.2 Atividade de água

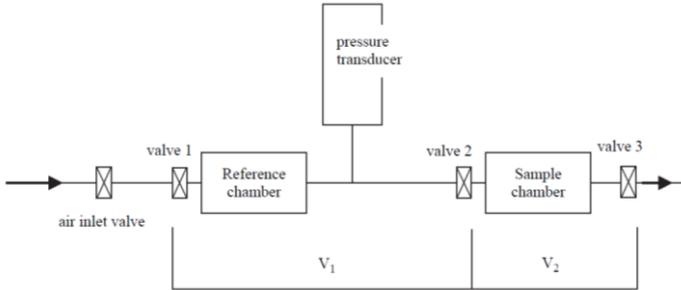
A atividade de água das amostras foi determinada seguindo a metodologia descrita no item 4.2.3.

5.2.3.3 Porosidade

A porosidade das amostras foi determinada seguindo a metodologia de Sereno, Silva e Mayor (2007). Um picnômetro de ar

comprimido foi utilizado para determinar o volume real das amostras (V_t) por deslocamento de gás, este equipamento está apresentado na Figura 22.

Figura 22: Diagrama esquemático do picnômetro a gás



Fonte: adaptado de Sereno, Silva e Mayor (2007).

O volume aparente (V_{ap}) foi determinado pelo método do empuxo com a utilização do n-heptano (LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980). O volume real e o volume aparente foram determinados em quadruplicata. A porosidade (espaço poroso sem líquido) foi calculada a partir da Equação 4.1:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{V_r}{V_{ap}}\right) \times 100 \quad (4.1)$$

5.2.3.4 Imagens da estrutura interna

A análise da estrutura interna das bananas desidratadas foi realizada utilizando um estereoscópio óptico (Optech, Alemanha) acoplado a uma câmera microscópica (Opticam, OPT 10000, Brasil). As imagens das amostras fraturadas manualmente foram analisadas utilizando um *software* (TSview, Tucsen, V 7.3.1.7, China).

5.2.3.5 Espessura

A espessura das amostras foi determinada utilizando um paquímetro. As amostras foram medidas em três pontos diferentes nas suas extremidades. A análise foi realizada em triplicata.

5.2.4 Determinação das propriedades acústicas e mecânicas

A determinação das propriedades acústicas e mecânicas foi realizada conforme metodologia descrita no item 4.2.5, apenas ensaios de perfuração foram realizados.

Foram realizadas triplicatas de processo e nove amostras técnicas foram avaliadas de cada dia de processo.

5.2.5 Determinação das propriedades sensoriais

Ensaio descritivos quantitativos foram realizados com os julgadores, selecionados e treinados conforme item 4.2.4, que avaliaram as amostras em relação ao atributo crocância. As amostras foram servidas em ordem randômica, separadas em copinhos plásticos identificados com três dígitos aleatórios. Juntamente com as amostras foram fornecidos quatro padrões da escala *Spectrum*, Barra de Granola, *Club Cracker*, Cereal de Aveia e Torrada, para ancorar algumas posições da escala de crocância e auxiliar na avaliação dos julgadores. Os julgadores foram instruídos a morder as amostras com os dentes molares. A intensidade de crocância de cada amostra foi descrita pelo avaliador através do uso da escala descritiva não estruturada de 15 pontos. Durante os testes sensoriais também foi solicitado ao avaliador que ordenasse as amostras de acordo com a preferência. As amostras foram obtidas em triplicata de processo e os testes sensoriais foram realizados em três dias diferentes. A ficha utilizada na avaliação dos produtos está descrita no APÊNDICE C.

5.2.6 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas conforme descrito no item 4.2.6.

Os resultados do teste de ordenação foram analisados estatisticamente com o programa Statistica 10.0 (StatSoft, Tulsa, EUA), através do teste de Friedman a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$).

5.3 Resultados e Discussões

As frutas utilizadas neste estudo apresentaram atividade de água de 0,976 a 0,977, SST de 16 a 21,7 °Brix e umidade de 67 a 70%.

5.3.1 Análise das propriedades físicas, mecânicas e acústicas

Os resultados das análises físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais estão apresentados na Tabela 20.

Amostras submetidas ao pulso de vácuo quando a temperatura interior alcançava 70 °C levou a produtos com a_w e umidade mais elevados do que àquelas submetidas ao pulso de vácuo na temperatura de 60 °C. Este resultado pode estar relacionado com a mudança de estrutura do produto que ocorre após a aplicação do primeiro pulso a 70 °C, neste período ocorre uma expulsão rápida (evaporação *flash*) da água contida no interior do produto, enquanto o produto parece estar amolecido. Sendo assim, a estrutura do mesmo se altera significativamente, de forma diferente do que ocorre a 60 °C.

Em amostras submetidas a apenas um pulso de vácuo esta estrutura manteve-se até o final do processo, já quando são aplicados 4 pulsos de vácuo, são formadas bolhas no primeiro pulso que se compactam novamente em pulsos seguintes.

Os produtos que foram produzidos com um único pulso de vácuo, apresentaram os valores mais altos e estatisticamente iguais de porosidade, independente da temperatura. Este comportamento pode estar associado à expansão na estrutura, que é provocada no primeiro pulso de vácuo. Os valores obtidos para densidade aparente, foram inversamente proporcionais à porosidade, assim como também foi verificado por Link, Tribuzi e Laurindo (2017b) e Monteiro, Carciofi e Laurindo (2016). Este comportamento ocorre porque a redução da densidade aparente está relacionada com a perda de água e a formação de poros durante a secagem (LIU et al., 2012).

Os produtos desidratados a 70 °C com a aplicação de um pulso de vácuo apresentaram os menores valores de força média, força máxima e área e os maiores valores de número de picos de força e número de picos acústicos, independente do filtro acústico utilizado.

Os maiores valores para os parâmetros relacionados com a intensidade sonora (SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$, $SPL_{Máx,10}$) foram encontrados nas bananas desidratadas a 70 °C (com aplicação de um e quatro pulsos de vácuo) e a 60 °C (com aplicação de quatro pulsos de vácuo).

Tabela 20: Propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais das bananas desidratadas pelo método KMFD com diferentes condições de processo e pelo método de secagem a vácuo

Parâmetro	60 °C - 1 pulso	60 °C - 4 pulsos	70 °C - 1 pulso	70 °C - 4 pulsos	Vácuo - Controle
Propriedades Físicas					
Atividade de água	0,153 ± 0,013 ^{bc}	0,156 ± 0,037 ^b	0,243 ± 0,016 ^a	0,270 ± 0,007 ^a	0,120 ± 0,017 ^c
Umidade (%)	0,99 ± 0,20 ^{bc}	0,69 ± 0,12 ^c	1,33 ± 0,26 ^{ab}	1,54 ± 0,21 ^a	0,82 ± 0,24 ^c
Porosidade (%)	63,0 ± 3,8 ^a	50,5 ± 4,6 ^c	62,5 ± 4,1 ^a	30,2 ± 4,4 ^c	50,1 ± 2,9 ^b
Densidade Aparente (g cm ⁻¹)	0,602 ± 0,044 ^{bc}	0,705 ± 0,075 ^b	0,512 ± 0,075 ^c	0,947 ± 0,072 ^a	0,729 ± 0,036 ^b
Espessura (mm)	5,28 ± 0,59 ^{bc}	4,49 ± 0,35 ^c	7,70 ± 0,7 ^a	5,54 ± 0,54 ^b	5,19 ± 0,67 ^{bc}
Propriedades Mecânicas					
Número de Picos de Força	8 ± 3 ^b	9 ± 3 ^b	16 ± 5 ^a	6 ± 3 ^d	9 ± 3 ^b
Força Máxima (N)	33,22 ± 16,84 ^a	35,28 ± 16,94 ^a	14,04 ± 9,11 ^b	36,67 ± 15,86 ^b	29,83 ± 15,80 ^a
Força Média (N)	15,74 ± 9,70 ^a	15,04 ± 8,65 ^a	4,30 ± 3,00 ^b	15,94 ± 8,94 ^a	14,08 ± 6,18 ^a
Área (N.s)	9,29 ± 5,28 ^a	9,84 ± 4,95 ^a	4,32 ± 2,87 ^b	9,11 ± 5,65 ^a	8,58 ± 4,11 ^a
Distância Linear	63,49 ± 26,85 ^{ab}	85,15 ± 35,49 ^a	56,52 ± 27,94 ^b	67,02 ± 30,47 ^{ab}	75,56 ± 40,57 ^{ab}
Propriedades Acústicas Filtro FIR					
Número de Picos Acústicos	1622 ± 941 ^{cd}	2309 ± 1155 ^{bc}	4616 ± 1278 ^a	2497 ± 745 ^b	1475 ± 640 ^d
SPL _{eq} (dB)	61,22 ± 4,20 ^{ab}	63,24 ± 3,52 ^{ab}	63,20 ± 2,74 ^{ab}	63,85 ± 3,64 ^a	60,43 ± 3,84 ^b
SPL _{MAX} (dB)	88,04 ± 9,86 ^b	92,74 ± 8,39 ^{ab}	96,00 ± 6,67 ^a	94,97 ± 7,77 ^a	86,51 ± 10,70 ^b
SPL _{Máx,10} (dB)	83,85 ± 9,28 ^b	88,76 ± 7,57 ^{ab}	91,28 ± 6,13 ^a	90,26 ± 7,45 ^a	82,80 ± 9,74 ^b
Propriedades Acústicas Filtro ARIMI					
Número de Picos Acústicos	2551 ± 1051 ^c	3172 ± 1313 ^{bc}	6297 ± 1283 ^a	3430 ± 808 ^b	2345 ± 903 ^c
SPL _{eq} (dB)	59,49 ± 4,40 ^{cd}	61,88 ± 3,68 ^{ab}	62,11 ± 3,09 ^{ab}	62,79 ± 3,57 ^a	58,53 ± 3,73 ^d
SPL _{MAX} (dB)	90,05 ± 9,59 ^b	93,95 ± 8,34 ^{ab}	97,24 ± 6,48 ^a	96,93 ± 7,26 ^a	87,08 ± 11,45 ^b
SPL _{Máx,10} (dB)	85,21 ± 8,77 ^{bc}	89,69 ± 7,77 ^{ab}	92,47 ± 6,12 ^a	91,74 ± 6,93 ^a	83,04 ± 10,19 ^c
Crocância Sensorial					
Valor Escala	5,44 ± 2,60 ^c	7,44 ± 3,40 ^b	12,84 ± 1,82 ^a	9,08 ± 3,34 ^b	4,46 ± 1,93 ^c

Nota: Os dados em cada linha com letras diferentes são significativamente diferentes (p<0.05). Os dados são apresentados como média ± desvio padrão

5.3.2 Análise das propriedades sensoriais

A crocância sensorial das bananas desidratadas por diferentes condições de processo está descrita na Tabela 20. Os painelistas não conseguiram perceber diferenças entre todas as amostras avaliadas. De acordo com a avaliação sensorial as amostras foram separadas em três grupos distintos em ordem decrescente de crocância: 1) 70 °C com aplicação de 1 pulso de vácuo; 2) 60 °C e 70 °C com aplicação de 4 pulsos de vácuo e 3) 60 °C com aplicação de 1 pulso de vácuo e amostra controle.

Ao provarem as amostras os painelistas foram instruídos a ordená-las conforme sua preferência. Pela análise de resíduos apresentada na Tabela 21 os avaliadores dividiram a preferência em dois grupos. Em primeiro lugar estão as amostras de bananas desidratadas pelo método KMFD a 70 °C e a 60 °C com a aplicação de um único pulso de vácuo e em segundo lugar, as amostras que foram secadas pelo método KMFD a 60 °C e 70 °C, ambas com aplicação de 4 pulsos de vácuo, e as amostras controle.

Com base em ambos os testes não é possível afirmar que a ordem de preferência das amostras está relacionada apenas com o atributo de crocância, outros fatores contribuíram para a escolha do avaliador.

Tabela 21: Contraste das diferenças entre os totais de ordenação das amostras de bananas desidratadas por diferentes processos de secagem

	60 °C 1 Pulso	60 °C 4 Pulsos	70 °C 1 Pulso	70 °C 4 Pulsos	Vácuo Controle
Soma Total	39^b	51^a	17^b	59^a	59^a
60 °C 1 Pulso	-	12	22	20	20
60 °C 4 Pulsos	-	-	34*	8	8
70 °C 1 Pulso	-	-	-	42*	42*
70 °C 4 Pulsos	-	-	-	-	0
Vácuo - Controle	-	-	-	-	-

Nota: * significativo ao nível de 5% pelo teste de Friedman (DMS = 24)

5.3.3 Análises das curvas de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo combinadas à análise da estrutura do produto

As Figuras 23 e 24 mostram os gráficos das medidas de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo e as fotos da estrutura dos produtos, respectivamente. No APÊNDICE F encontram-se duas replicatas das curvas de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo para as bananas desidratadas por KMFD utilizando diferentes condições de processo.

Os gráficos da Figura 23 apresentam curvas irregulares, com numerosos picos de força, comportamento resultante de uma estrutura quebradiça e relativamente frágil que sofreu fratura das paredes celulares (LAURINDO; PELEG, 2008; PAENGGKANYA; SOPONRONNARIT; NATHAKARANAKULE, 2015) acompanhados por numerosos picos acústicos, típicos de produtos crocantes (CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; SALVADOR et al., 2009; VARELA et al., 2006; VINCENT, 1998).

A comparação das Figuras 23 e 24 indica que poros maiores levam a gráficos com mais picos de força e picos acústicos, sugerindo um aumento na crocância do alimento. Isto pode ser verificado principalmente no item C de ambas as figuras, que representa o processo de KMFD utilizando 70 °C e 1 pulso de vácuo.

Todos os processos de secagem realizados neste estudo levaram a produtos com visual espaços vazios. Pela avaliação da Figura 24 só é possível perceber maiores diferenças entre as amostras nos processos de secagem por KMFD a 70 °C com 1 e 4 pulsos de vácuo, os demais processos levaram a amostras com estruturas muito semelhantes. Conforme apresentado na Figura 23 tais processos também resultaram em gráficos que indicam valores semelhantes de número de picos de força, força máxima e $SPL_{MÁX}$.

Figura 23: Gráficos típicos mostrando a força *versus* tempo e SPL *versus* tempo durante a perfuração das bananas desidratadas pelo método KMFd utilizando diferentes condições de processo (a) 60 °C – 1 pulso, (b) 60 °C – 4 pulsos, (c) 70 °C – 1 pulso, (d) 70 °C – 4 pulsos e amostras (e) vácuo - controle

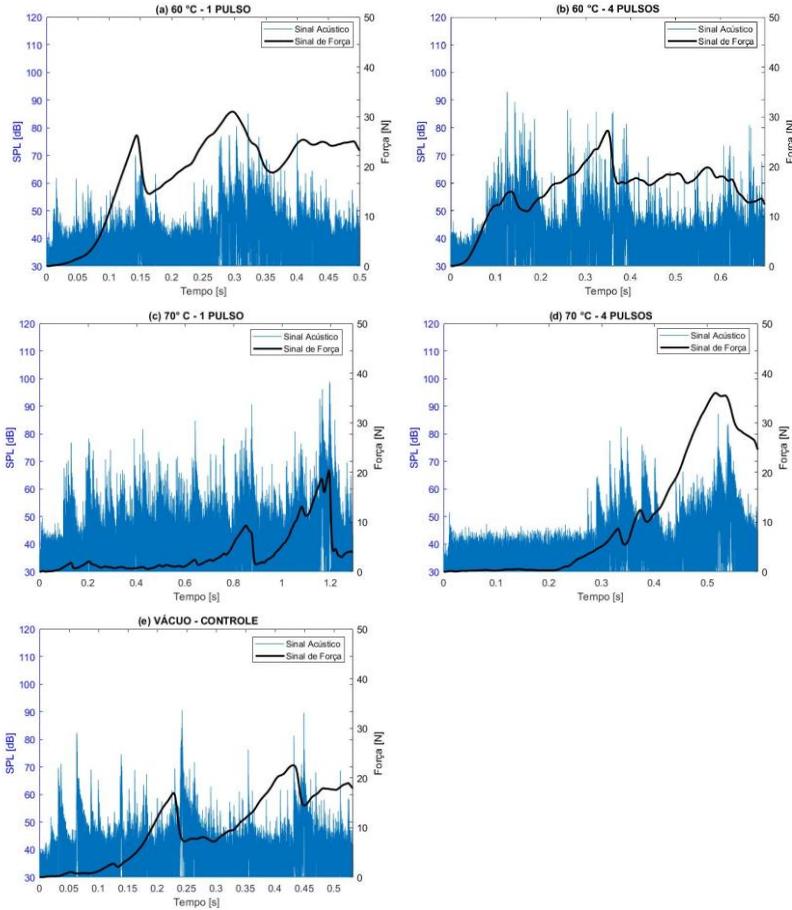
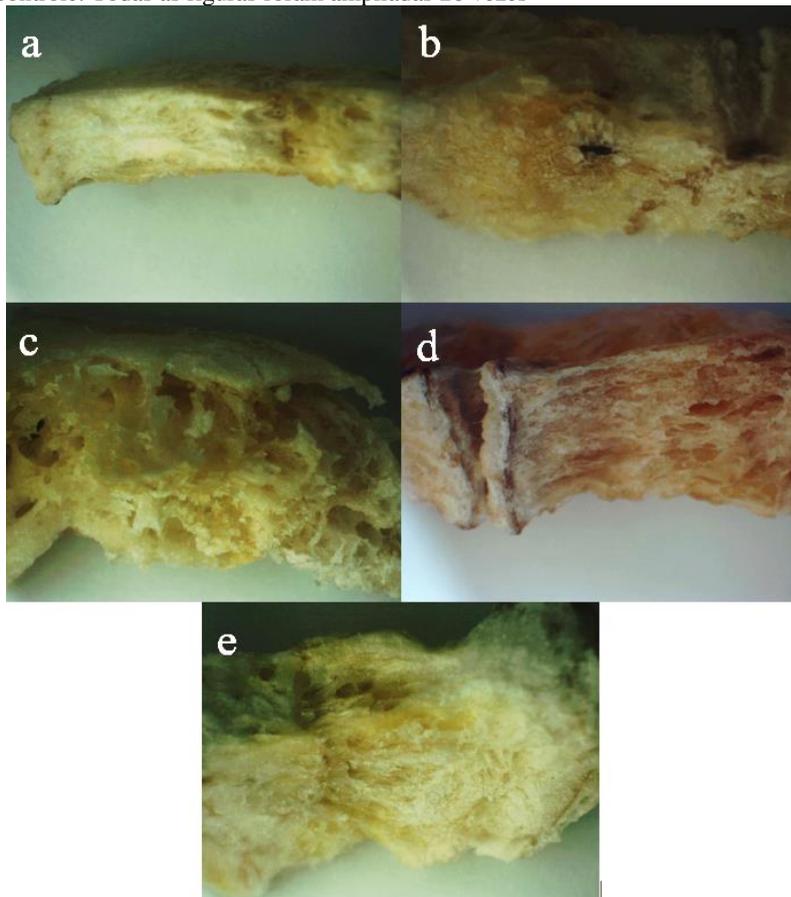


Figura 24: Imagens do estereoscópio óptico das bananas desidratadas pelo método KMFD utilizando diferentes condições de processo (a) 60 °C – 1 pulso, (b) 60 °C – 4 pulsos, (c) 70 °C – 1 pulso, (d) 70 °C – 4 pulsos e (e) amostra controle. Todas as figuras foram ampliadas 20 vezes



5.3.4 Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro FIR

A matriz de correlação de Pearson, das bananas desidratadas por diferentes condições de processo, para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico FIR, Tabela 22, indicam poucas correlações entre as variáveis. No entanto, a análise KMO resultou no valor de 0,702, indicando que a análise fatorial pode ser realizada.

Tabela 22: Matriz de correlação de Pearson para bananas desidratadas por diferentes condições de processo – Filtro acústico FIR

Atividade de Água	Unidade	Densidade	Porosidade	Espessura	Nº Picos Força	Força Máxima	Força Média	Area	Distância Linear	Nº Picos Acústicos	SPL _{eq}	SPL _{MAX}	SPL _{MAX,10}	Crocância Sensorial
1														
Unidade	0,885													
Densidade	0,262	1												
Porosidade	-0,402	-0,976	1											
Espessura	0,558	0,517	-0,474	1										
Nº Picos Força	0,152	0,014	-0,600	0,493	1									
Força Máxima	-0,137	-0,085	0,398	-0,322	-0,487	1								
Força Média	-0,205	-0,132	0,369	-0,276	-0,488	-0,676	1							
Area	-0,194	-0,171	0,272	-0,199	-0,411	-0,518	0,863	1						
Distância Linear	-0,183	-0,220	0,140	-0,116	-0,308	-0,129	0,749	0,525	1					
Nº Picos Acústicos	0,549	0,359	-0,332	0,179	0,677	0,670	-0,377	-0,475	-0,072	1				
SPL _{eq}	0,331	0,222	0,117	-0,173	0,090	0,074	0,257	0,020	0,030	0,461	1			
SPL _{MAX}	0,399	0,279	0,039	-0,120	0,230	0,192	0,138	-0,055	-0,001	0,363	0,586	1		
SPL _{MAX,10}	0,385	0,260	0,041	-0,121	0,202	0,163	-0,053	-0,002	0,402	0,601	0,944	0,984	1	
Crocância Sensorial	0,612	0,426	-0,163	0,024	0,583	-0,306	-0,393	-0,340	-0,163	0,594	0,302	0,384	0,380	1

Nota: As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

A Tabela 23 mostra os autovalores obtidos a partir da análise fatorial dos componentes principais. Os três primeiros componentes principais foram selecionados para as próximas avaliações.

Tabela 23: Interpretação dos fatores para o teste de penetração – filtro acústico FIR

Fator	Autovalor	%Variância	%Variância Acumulada
1	5,45	36,34	36,34
2	4,10	27,32	63,66
3	2,46	16,37	80,03
4	1,18	7,83	87,87
5	0,51	3,41	91,28
6	0,47	3,16	94,44
7	0,31	2,07	96,50
8	0,15	1,01	97,51
9	0,14	0,93	98,45
10	0,08	0,51	98,95
11	0,07	0,45	99,40
12	0,05	0,33	99,73
13	0,03	0,18	99,91
14	0,01	0,06	99,97
15	0,00	0,03	100,00

Na Tabela 24 estão mostrados os três componentes principais que juntos explicam 80,03% da variância total dos dados. O PC1 possui influência positiva das variáveis: espessura, número de picos de força, número de picos acústicos e crocância sensorial, por outro lado, este componente principal está sendo negativamente influenciado pelas variáveis área, força média e força máxima. Este primeiro componente está relacionado com a crocância das bananas.

O PC2, fortemente influenciado pelas variáveis SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$ e $SPL_{Máx,10}$, indica que este componente possui relação com a intensidade do som emitido durante a quebra dos produtos. O PC3, que explica 16,37% da variância dos dados, não é fortemente influenciado por nenhuma das variáveis analisadas, sendo assim, este componente não será utilizado na etapa de avaliação do *biplot* dos componentes principais.

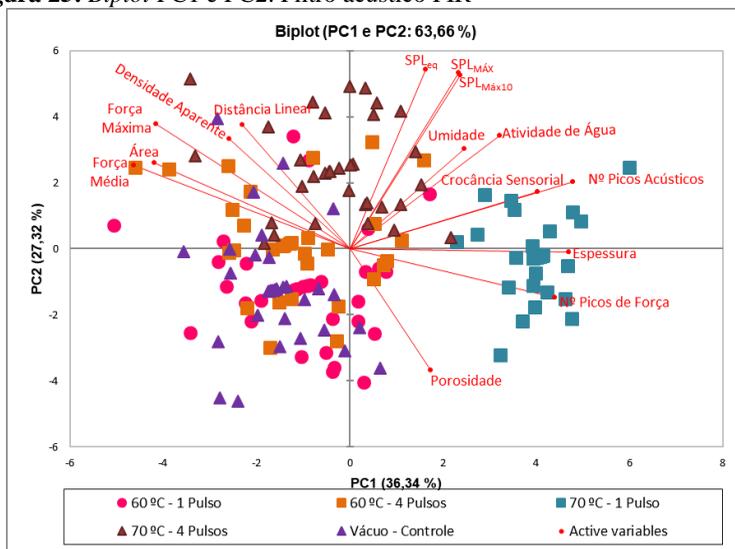
Tabela 24: Análise de componentes principais para o teste de perfuração - filtro acústico FIR

	PC1 (36,34%)	PC2 (27,32%)	PC3 (16,37%)
Atividade de Água	0,56	0,52	-0,53
Umidade	0,42	0,45	-0,65
Densidade Aparente	-0,45	0,50	-0,65
Porosidade	0,30	-0,55	0,68
Espessura	0,81	-0,01	-0,04
Nº Picos de Força	0,76	-0,22	0,34
Força Máxima	-0,72	0,57	0,19
Força Média	-0,80	0,38	0,09
Área	-0,73	0,39	0,21
Distância Linear	-0,40	0,57	0,53
Nº Picos Acústicos	0,83	0,30	0,18
SPL _{eq}	0,28	0,82	0,33
SPL _{MÁX}	0,41	0,79	0,32
SPL _{Máx,10}	0,40	0,80	0,35
Crocância Sensorial	0,70	0,26	-0,12

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

O *Biplot* dos dois primeiros componentes principais para bananas desidratadas por diferentes condições de processo usando o filtro acústico FIR está apresentado na Figura 25.

Figura 25: Biplot PC1 e PC2. Filtro acústico FIR



A Tabela 22 e a Figura 25 indicam que as variáveis pertencentes a cada propriedade avaliada (física, acústica, mecânica e sensorial) apenas correlacionaram entre si, mas não com as variáveis das demais propriedades.

Na avaliação dos parâmetros físicos foram encontradas correlações significativas entre atividade de água e umidade ($r = 0,885$) e porosidade e densidade aparente ($r = -0,976$). As demais propriedades físicas não correlacionaram entre si e nem com os demais parâmetros avaliados.

As variáveis mecânicas relacionadas à força, área e distância linear apresentaram correlações fortes entre si: força média e força máxima ($r = 0,884$); força máxima e área ($r = 0,863$); força máxima e distância linear ($r = 0,749$) e força média e área ($r = 0,945$), indicando a relação entre parâmetros relacionados à dureza das bananas (como força) com os demais parâmetros mecânicos como área e distância linear.

Em relação aos parâmetros acústico, foram encontradas fortes relações entre as variáveis relacionadas com intensidade sonora: SPL_{eq} e SPL_{Máx} ($r = 0,910$); SPL_{Máx} e SPL_{Máx,10} ($r = 0,984$) e SPL_{eq} e SPL_{Máx,10} ($r = 0,944$).

A crocância sensorial não apresentou correlações acima de 0,7 com nenhuma das variáveis avaliadas. As maiores correlações obtidas para este parâmetro foram com a atividade de água ($r = 0,612$) e com o número

de picos acústicos ($r = 0,594$), no entanto estas correlações são consideradas fracas.

Conforme apresentado na Figura 25 as amostras do mesmo processo estão bem distribuídas e misturadas com amostras de outros processos no *biplot*. As únicas que se diferenciaram das demais foram as bananas desidratadas a temperatura de 70 °C utilizando um único pulso de vácuo. Com base no *biplot* da Figura 25, o processo de secagem a 70 °C com um pulso de vácuo produziu as bananas mais crocantes, com maior número de picos acústicos, picos de força, espessura e crocância sensorial, conforme indicado pelo PC1.

Diversas razões podem ter levado à dificuldade de correlacionar as variáveis e diferenciar as amostras neste estudo. A variabilidade do processo é um importante fator a ser considerado. Triplicatas de cada processo foram avaliadas e diferenças entre elas foram verificadas. A Figura 25 indica que amostras do mesmo processo diferiram entre si, apresentando grande variância de uma mesma propriedade, o que dificulta encontrar correlações entre as propriedades. Por fim, é necessário ressaltar que o painel sensorial é semi-treinado e quando as diferenças entre as amostras são pequenas a identificação destas pelo painel é dificultada.

5.3.5 Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro Arimi

A matriz de correlação de Pearson, das bananas desidratadas por diferentes condições de processo, para ensaios mecânicos de perfuração utilizando o filtro acústico Arimi, Tabela 25, indicam poucas correlações entre as variáveis. Entretanto, a análise KMO resultou no valor de 0,705, indicando que a análise fatorial pode ser aplicada aos dados.

Tabela 25: Matriz de correlação de Pearson para bananas desidratadas por diferentes condições de processo - Filtro acústico Arimi

Atividade de Água	1	Atividade de Água	1	Unidade	Densidade	Aparente	Porosidade	Espessura	Nº Picos	Força	Força	Força	Força Média	Área	Distância	Linear	Nº Picos	SPL _{eq}	SPL _{MAX}	SPL _{MÁX10}	Crocância	Sensorial		
Umidade	0,885	0,262	0,359	1																				
Densidade Aparente	-0,402	-0,443			1																			
Porosidade	0,558	0,517	0,333			1																		
Espessura	0,152	0,014	-0,600	0,493	0,333	1																		
Nº Picos Força	-0,137	-0,085	0,398	-0,322	-0,487	-0,597	1																	
Força Máxima	-0,205	-0,132	0,369	-0,276	-0,488	-0,676	0,884	1																
Força Média	-0,194	-0,171	0,272	-0,199	-0,411	-0,518	0,863	0,945	1															
Área	-0,183	-0,220	0,140	-0,116	-0,308	-0,129	0,749	0,749	-0,442	-0,507	-0,381	-0,177	1											
Distância Linear	0,550	0,368	-0,387	0,232	0,721	0,118	0,156	-0,039	-0,038	0,303	0,439	1												
Nº Picos Acústicos	0,400	0,282	0,126	-0,194	0,104	0,118	0,156	-0,039	-0,038	0,303	0,439	1												
SPL _{eq}	0,431	0,318	0,051	-0,124	0,194	0,198	0,075	-0,078	-0,053	0,209	0,517	0,905	1											
SPL _{MAX}	0,425	0,301	0,043	-0,122	0,197	0,215	0,077	-0,078	-0,058	0,232	0,547	0,937	0,984	1										
SPL _{MÁX10}	0,612	0,426	-0,163	0,024	0,583	0,386	-0,306	-0,393	-0,340	-0,163	0,608	0,346	0,363	0,374	1									
Crocância Sensorial																								

Nota: As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

A Tabela 26 mostra os autovalores obtidos a partir da análise fatorial dos componentes principais. Os três primeiros componentes principais foram selecionados para as próximas avaliações.

Tabela 26: Interpretação técnica dos fatores para o teste de perfuração - filtro acústico Arimi

Fator	Autovalor	%Variância	%Variância Acumulada
1	5,61	37,40	37,40
2	3,93	26,22	63,62
3	2,28	15,22	78,84
4	1,26	8,40	87,23
5	0,59	3,90	91,14
6	0,48	3,19	94,32
7	0,32	2,16	96,49
8	0,15	1,00	97,49
9	0,13	0,86	98,34
10	0,08	0,54	98,89
11	0,08	0,50	99,39
12	0,05	0,34	99,73
13	0,03	0,18	99,91
14	0,01	0,06	99,97
15	0,00	0,03	100,00

Na Tabela 27 estão mostrados os três componentes principais que juntos explicam 78,84% da variância total dos dados. O PC1 possui influência positiva das variáveis: espessura, número de picos de força e número de picos acústicos e está sendo negativamente influenciado pelas variáveis: área, força média e força máxima. Diferente do que foi verificado quando o filtro FIR foi utilizado, com a utilização do filtro Arimi a crocância sensorial não apresentou influência significativa sobre o PC1, embora tenha apresentado o valor de 0,69, muito próximo à correlação mínima aceitável de 0,7.

O PC2 foi novamente influenciado pelas variáveis acústicas SPL_{Leq} , $SPL_{MÁX}$ e $SPL_{Máx,10}$, indicando que este componente possui relação com a intensidade do som emitido durante a quebra dos produtos. Novamente o PC3, explica pouco da variância dos dados (15,22%) e não será utilizado na etapa de avaliação do *biplot* dos componentes principais.

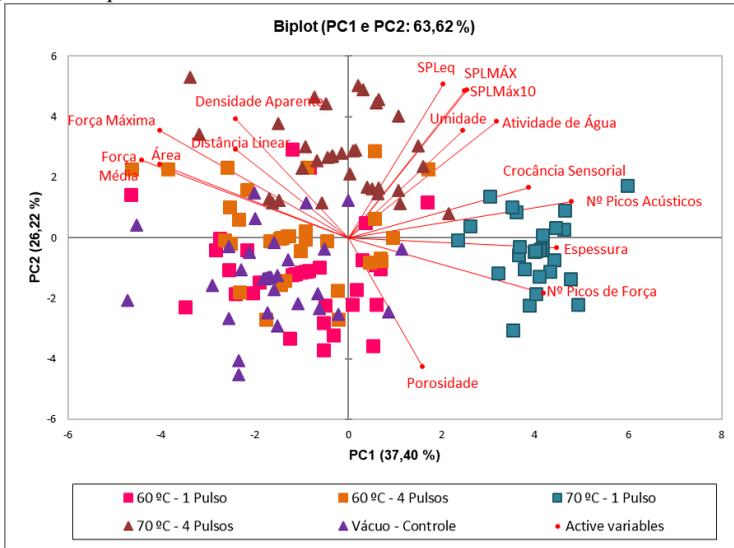
A influência das variáveis sobre os componentes principais foi praticamente a mesma, independente do filtro acústico utilizado.

Tabela 27: Análise de componentes principais para o teste de perfuração – filtro acústico Arimi

	PC1 (37,40%)	PC2 (26,22%)	PC3 (15,22%)
Atividade de Água	0,57	0,57	-0,44
Umidade	0,44	0,53	-0,56
Densidade Aparente	-0,43	0,59	-0,60
Porosidade	0,29	-0,64	0,62
Espessura	0,80	-0,05	-0,04
Nº Picos de Força	0,75	-0,28	0,32
Força Máxima	-0,72	0,53	0,26
Força Média	-0,79	0,38	0,15
Área	-0,72	0,37	0,27
Distância Linear	-0,43	0,44	0,55
Nº Picos Acústicos	0,86	0,18	0,20
SPL _{eq}	0,36	0,76	0,36
SPL _{MÁX}	0,45	0,73	0,37
SPL _{Máx10}	0,46	0,73	0,39
Crocância Sensorial	0,69	0,25	-0,07

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito)

O *Biplot* dos dois primeiros componentes principais para bananas desidratadas por diferentes condições de processo usando o filtro acústico Arimi está apresentado na Figura 26.

Figura 26: *Biplot* PC1 e PC2. Filtro acústico Arimi

A Tabela 25 e o *biplot* (Figura 26) indicam que a utilização do filtro acústico Arimi influenciou muito pouco nas correlações obtidas entre as variáveis e na distribuição das amostras e dos parâmetros no *biplot*. Desta forma, os dois tipos de filtro acústicos testados (FIR e Arimi) podem ser utilizados no pós-processamento dos parâmetros acústicos de bananas desidratadas por KMFD utilizando diferentes condições de processo.

5.4 Conclusões Parciais

As diferentes condições de processo testadas resultaram em bananas com crocância relativamente semelhantes entre si. Nenhum método, isolado ou combinado, conseguiu diferenciar todas as amostras. Fatores como variabilidade de processo e inexperiência do painel podem ter contribuído para este resultado. No entanto, é importante ressaltar que as medidas combinadas foram tão sensíveis quanto o painel sensorial em determinar a crocância das bananas desidratadas, indicando que estas medições podem ser utilizadas para substituir o painel sensorial.

A aplicação do PCA para avaliar as variáveis físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais resultou em dois componentes principais. O primeiro, fortemente relacionado com parâmetros utilizados para descrever a crocância como, número de picos acústicos, número de picos

de força e crocância sensorial e o segundo, relacionado com a intensidade sonora.

O pós-processamento dos dados utilizando o filtro FIR ou o filtro Arimi não influenciou nos resultados obtidos, indicando que ambos os filtros podem ser utilizados sem perdas nas correlações entre as variáveis.

O processo de secagem utilizando a temperatura de 70 °C com aplicação de um pulso de vácuo produziu as bananas mais crocantes do estudo.

6. MEDIDAS ACÚSTICAS, MECÂNICAS E SENSORIAIS DE BANANAS DESIDRATADAS POR DIFERENTES PROCESSOS DE SECAGEM

6.1 Introdução

A secagem é uma das mais antigas, comuns e diversificadas operações unitárias, é comumente descrita como o processo de remoção de umidade com a finalidade de produzir um produto estável (MUJUMDAR, 2006).

A secagem de frutas e hortaliças é um processo no qual a remoção da água e a conseguinte diminuição da atividade de água reduzem o crescimento de micro-organismos e a ocorrência de reações enzimáticas e não enzimáticas na matriz do material (ARGYROPOULOS; HEINDL; MULLER, 2011; KUROSZAWA et al., 2012; ZHANG et al., 2006) preservando sua estrutura e suas características sensoriais e valores nutricionais (AGUILERA, 2003). O mercado de produtos desidratados vem crescendo no Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de 2013 para 2014, a produção de frutas secas desidratadas ou liofilizadas no Brasil saltou de 8,2 milhões de quilos para 12,1 milhões de quilos respectivamente (IBGE, 2014).

A desidratação de frutas e hortaliças pode ser realizada por diferentes métodos como, por exemplo: secagem solar, secagem com ar quente, secagem a vácuo e liofilização. O método de secagem influencia diretamente as características sensoriais e nutricionais do produto final. A secagem por ar quente é a mais antiga técnica para conservar alimentos, neste processo o sólido a ser seco é exposto a um fluxo contínuo de ar quente e a sua umidade é evaporada. O produto final normalmente possui qualidade inferior em comparação com o alimento de origem. Por outro lado, a liofilização é considerada o melhor método de secagem quanto à qualidade dos produtos obtidos, porém apresenta elevados custos e tempos de processo que inviabilizam seu uso em muitos casos (RATTI, 2001).

Processos alternativos de secagem que permitam a produção de produtos secos e crocantes, com alta qualidade e menores tempos de processo são desejados. Nos processos *multi-flash-drying*, como KMFD e CMFD, os produtos são aquecidos à pressão atmosférica até a temperatura desejada e em seguida um pulso de vácuo é aplicado, levando à evaporação instantânea e ao resfriamento da amostra. Estes processos necessitam de baixo investimento e, em muitos casos, podem ser uma alternativa à liofilização (LAURINDO; PORCIUNCULA; ZOTARELLI,

2011; PORCIUNCULA; SEGURA; LAURINDO, 2016; ZOTARELLI; PORCIUNCULA; LAURINDO, 2012).

Neste estudo, bananas desidratadas foram obtidas utilizando diferentes processos de desidratação (secagem convectiva, secagem a vácuo, liofilização e secagem KMFD) a fim de se obter amostras de bananas desidratadas com diferentes características. Após a realização das secagens, a crocância das amostras foi avaliada por medidas acústicas, mecânicas e sensoriais. As correlações entre estas medidas foram possibilitadas por meio da matriz de correlação e da análise de componentes principais.

6.2 Material e Métodos

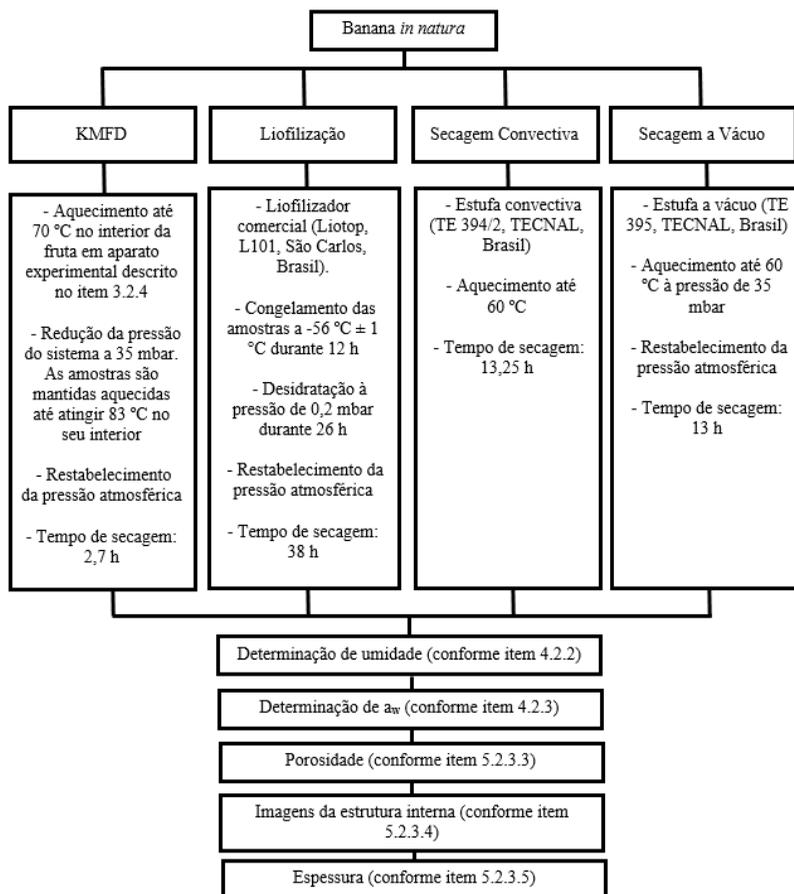
6.2.1 Matéria-prima

As bananas da variedade Prata foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, Brasil). As frutas foram selecionadas pelo grau de maturação, determinado pela análise visual e conteúdo de sólidos solúveis (SST) (usando um refratômetro óptico Pocket refractometer Atago, Modelo - PAL-BX/RI, Japão). As frutas selecionadas foram descascadas e fatiadas com uma espessura de 5 mm.

6.2.2 Experimentos de secagem e caracterização das amostras

As bananas foram desidratadas por diferentes processos de secagem e caracterizadas conforme descrito na Figura 27.

Figura 27: Fluxograma de secagem das bananas por diferentes processos e caracterização das amostras



6.2.3 Propriedades acústicas e mecânicas

- Testes com diferentes velocidades e *probes*

Amostras de bananas, desidratadas conforme item 3.2.4, foram acondicionadas em dessecadores, contendo soluções salinas saturadas de cloreto de lítio ($a_w = 0,116$), até atingirem o equilíbrio. As propriedades acústicas e mecânicas foram determinadas conforme item 4.2.5.

As amostras foram fraturadas utilizando dois tipos de *probes* cilíndricos, P/2 (2 mm de diâmetro) nos ensaios de perfuração e P/50 (50 mm de diâmetro) nos ensaios de compressão. Três velocidades diferentes de teste foram utilizadas, 1, 3 e 10 mm s⁻¹ para cada tipo de ensaio mecânico. As duas primeiras são velocidades frequentemente utilizadas em testes de compressão e perfuração (ARIMI et al., 2010; CASTRO-PRADA et al., 2007; CHANVRIER et al., 2014; CHEN; KARLSSON; POVEY, 2005; LINK et al., 2017a, 2017b; SALVADOR et al., 2009; TANIWAKI; KOHYAMA, 2012; VARELA et al., 2006; WIKTOR et al., 2016) e a última é utilizada em alguns estudos para simular a mordida e a mastigação sensorial (MEULLENET; FINNEY, 2002).

Para a escolha da velocidade mais adequada para cada tipo de *probe*, os dados acústicos foram filtrados utilizando o filtro Arimi. O SPL mínimo de corte do sinal acústico foi variado de 55 a 120 dB e o parâmetro número de picos acústicos foi contabilizado em cada faixa de SPL testada.

- Determinação das propriedades acústicas e mecânicas de bananas desidratadas por diferentes processos

As propriedades acústicas e mecânicas das bananas desidratadas por diferentes processos foram determinadas seguindo a metodologia descrita no item 4.2.5. Para a *probe* P/2, a velocidade de teste utilizada foi de 10 mm s⁻¹ e para a *probe* P/50, a velocidade de teste utilizada foi de 1 mm s⁻¹. Foram realizadas triplicatas de processo e nove amostras técnicas foram avaliadas de cada dia de processo.

6.2.4 Determinação das propriedades sensoriais

Ensaio descritivos quantitativos foram realizados com os julgadores, selecionados e treinados conforme item 4.2.4, que avaliaram as amostras em relação ao atributo crocância. As amostras foram servidas em ordem randômica, separadas em copinhos plásticos identificados com três dígitos aleatórios. Juntamente com as amostras foram fornecidos quatro padrões da escala *Spectrum*, Barra de Granola, *Club Cracker*, Cereal de Aveia e Torrada, para ancorar algumas posições da escala de crocância e auxiliar na avaliação dos julgadores. Os julgadores foram instruídos a morder as amostras com os dentes molares. A intensidade de crocância de cada amostra foi descrita pelo avaliador através do uso da escala descritiva não estruturada de 15 pontos.

Análises de preferência foram realizadas com 50 avaliadores não treinados, com idade entre 18 e 37 anos obtidos aleatoriamente no departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC. As amostras foram servidas em ordem randômica, separadas em copinhos plásticos identificados com três dígitos aleatórios e os avaliadores foram instruídos a ordenar as amostras da menos preferida para a mais preferida.

As fichas utilizadas durante as análises sensoriais estão nos APÊNDICES C e D.

6.2.5 Análise estatística

A análise estatística foi realizada conforme item 4.2.6. O método de rotação *Varimax* foi utilizado para melhor interpretação dos componentes principais.

Os resultados do teste de ordenação foram analisados através do teste de Christensen a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$).

6.3 Resultados e Discussões

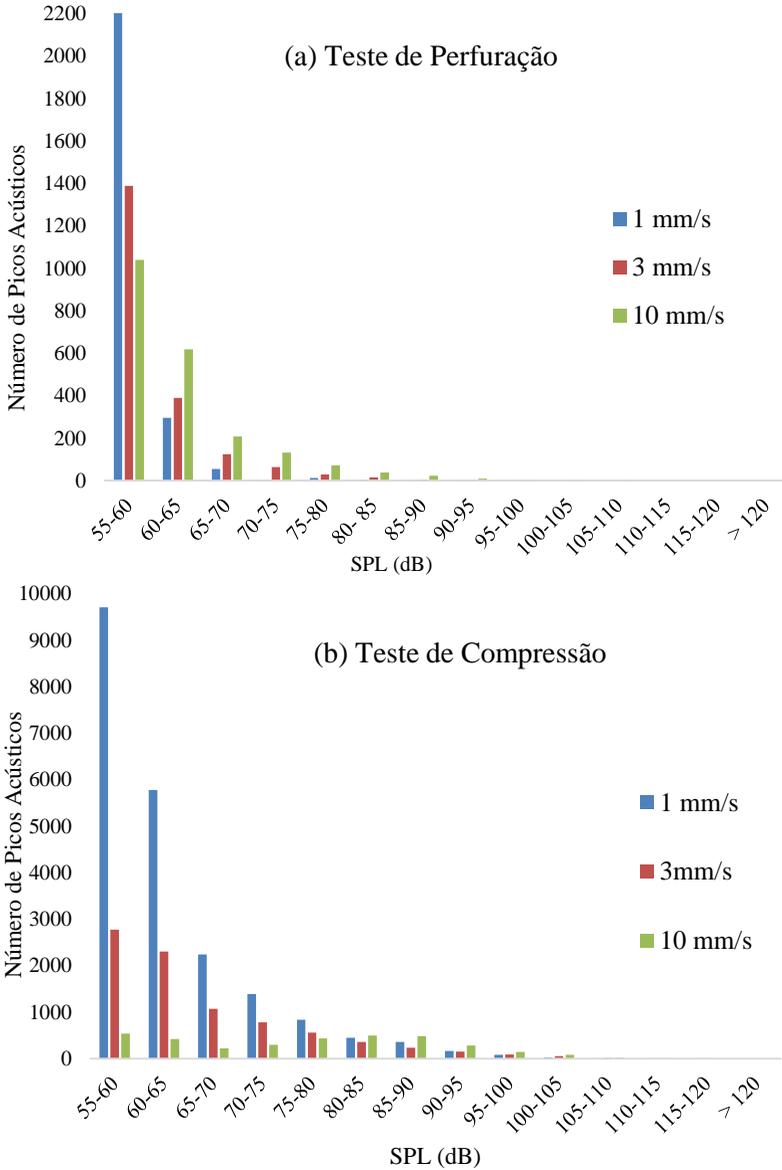
As bananas utilizadas neste estudo apresentaram atividade de água entre 0,976 e 0,980, SST entre 21,6 e 23,4 °Brix e umidade entre 67,8% e 69,4%.

6.3.1 Determinação da velocidade para cada *probe*

Na Figura 28 estão descritos os valores de número de picos acústicos encontrados em diferentes faixas de SPL, durante os testes de perfuração (a) e compressão (b).

No Capítulo 4 foi verificada a relação positiva do aumento do SPL com a crocância sensorial, sendo assim, é desejável que a velocidade de teste permita detectar as fraturas, e consequentemente os picos acústicos, em todas as faixas de SPL filtradas.

Figura 28: Número de picos acústicos *versus* SPL para (a) Teste de Perfuração e (b) Teste de Compressão



Para o teste de perfuração das amostras, inicialmente foram verificados mais picos acústicos utilizando a velocidade de 1 mm s^{-1} . No entanto, com o aumento do SPL, a velocidade de 10 mm s^{-1} foi a que mais detectou picos acústicos. A velocidade de 10 mm s^{-1} foi a escolhida para os próximos testes de perfuração de bananas, esta velocidade é frequentemente utilizada na tentativa de correlacionar a mastigação humana com testes instrumentais e a sua utilização para correlacionar com medidas sensoriais pode ser bastante interessante.

Já para o teste de compressão, a velocidade de 10 mm s^{-1} detectou poucos picos acústicos em todas as faixas de SPL testadas, não sendo indicada para este tipo de ensaio mecânico. Por outro lado, a velocidade de 1 mm s^{-1} detectou numerosos picos acústicos em praticamente todas as faixas de SPL testadas e foi a velocidade escolhida para a realização dos demais testes de compressão de bananas.

6.3.2 Análise das propriedades físicas, mecânicas e acústicas

As propriedades das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem estão descritas nas Tabela 28 e 29.

Não foi possível realizar ensaios de compressão com as amostras de bananas liofilizadas. A força necessária para comprimir estas amostras excedeu a força máxima suportada pela célula de carga do equipamento (25 kg).

Conforme apresentado na Tabela 28, os processos de secagem testados resultaram em amostras com porosidades estatisticamente diferentes. As amostras mais porosas foram obtidas pelos processos de KMFD e liofilização e as menos porosas foram as bananas desidratadas a vácuo. Resultados semelhantes foram obtidos por Link, Tribuzi e Laurindo (2017a) que utilizaram estes mesmos processos de secagem para desidratar fatias de manga e observaram maior porosidade nas amostras secas por liofilização e KMFD e menor porosidade nas mangas desidratadas por secagem a vácuo e convectiva. Porciuncula, Segura e Laurindo (2016) também relataram maior porosidade nas amostras de bananas desidratadas por KMFD e menor porosidade nas bananas secas por secagem convectiva e a vácuo.

Embora as amostras obtidas pelos métodos de secagem a vácuo e convectivo tenham apresentado valores iguais de número de picos de força, estes processos resultaram em produtos bem diferentes entre si. Os valores de umidade e atividade de água indicam que a amostra obtida pelo processo a vácuo é mais seca e as propriedades mecânicas (força máxima

e força média) indicam que esta amostra é mais dura em relação a amostra obtida pela secagem convectiva.

As espessuras das bananas indicam que houve encolhimento das amostras obtidas pela secagem convectiva e pela secagem a vácuo. As bananas liofilizadas não sofreram alteração no seu volume e as amostras obtidas pelo método KMFD sofreram expansão. Estes resultados foram semelhantes aos encontrados por Porciuncula, Segura e Laurindo (2016) ao desidratar bananas por KMFD e Zotarelli, Porciuncula e Laurindo (2012) ao secar amostras de manga e banana por CMFD.

As bananas secas por KMFD apresentaram os menores valores de umidade e densidade aparente e maiores valores de porosidade, espessura e número de picos de força. Porciuncula, Segura e Laurindo (2016) também verificaram que bananas desidratadas por KMFD apresentaram alta porosidade, encolhimento pouco evidente e textura crocante com base em gráficos de força *versus* deformação.

O parâmetro número de picos de força, em muitos estudos associados à crocância sensorial, não conseguiu diferenciar as amostras de bananas desidratadas a vácuo e por convecção.

As propriedades acústicas das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem utilizando os filtros FIR e Arimi são apresentadas na Tabela 29. Da análise dos dados é possível afirmar que a escolha do filtro acústico é um parâmetro importante a ser considerado neste estudo. Com os dados filtrados a partir do filtro Arimi, mais picos acústicos foram obtidos e todas as amostras apresentaram diferenças significativas entre si. Com os dados filtrados utilizando o filtro FIR não foi possível constatar diferenças significativas do parâmetro número de picos acústicos para as amostras de bananas desidratadas a vácuo e por convecção. Nos capítulos 4 e 5 também foram encontrados mais picos acústicos utilizando o filtro Arimi, no entanto, a escolha do filtro não influenciou na discriminação de crocância entre as amostras.

As amostras de bananas desidratadas por KMFD apresentaram os maiores valores de número de picos acústicos, SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$ e $SPL_{Máx,10}$ e as amostras de bananas secas por convecção os menores valores para estas mesmas variáveis.

Tabela 28: Propriedades físicas, mecânicas e sensoriais das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem

Parâmetro	KMFD	Liofilização	Secagem a vácuo	Secagem convectiva
Propriedades Físicas				
Atividade de água	0,216 ± 0,043 ^b	0,168 ± 0,019 ^c	0,244 ± 0,024 ^b	0,468 ± 0,026 ^a
Umidade (%)	0,77 ± 0,49 ^c	2,50 ± 0,24 ^{bc}	3,69 ± 0,88 ^b	10,79 ± 3,61 ^a
Porosidade (%)	64,40 ± 2,20 ^a	51,70 ± 2,40 ^b	19,21 ± 1,16 ^d	24,90 ± 2,34 ^c
Densidade Aparente (g cm ⁻¹)	0,478 ± 0,039 ^c	0,729 ± 0,036 ^b	1,115 ± 0,013 ^a	1,197 ± 0,034 ^a
Espessura (mm)	7,53 ± 0,60 ^a	4,95 ± 0,37 ^b	3,55 ± 0,28 ^c	3,24 ± 0,22 ^c
Propriedades Mecânicas Teste de Perfuração				
Número de Picos de Força	8 ± 2 ^a	6 ± 2 ^b	1 ± 1 ^c	1 ± 1 ^c
Força Máxima (N)	23,53 ± 12,30 ^b	16,91 ± 7,49 ^b	87,38 ± 35,13 ^a	2,78 ± 1,81 ^c
Força Média (N)	9,12 ± 6,26 ^b	9,79 ± 4,30 ^b	43,32 ± 18,28 ^a	1,30 ± 0,71 ^c
Área (N.s)	13,08 ± 21,03 ^a	9,19 ± 11,17 ^{ab}	16,04 ± 18,03 ^a	0,61 ± 0,85 ^b
Distância Linear	66,61 ± 28,91 ^b	32,35 ± 14,59 ^c	102,42 ± 38,68 ^a	3,91 ± 1,86 ^d
Propriedades Mecânicas Teste de Compressão				
Número de Picos de Força	40 ± 14 ^a	NA	2 ± 3 ^b	1 ± 1 ^b
Força Máxima (N)	144,32 ± 42,61 ^a	NA	190,23 ± 98,55 ^a	32,69 ± 21,31 ^b
Força Média (N)	53,81 ± 15,99 ^a	NA	77,48 ± 44,93 ^a	9,05 ± 6,86 ^b
Área (N.s)	113,08 ± 73,13 ^a	NA	52,26 ± 60,37 ^b	8,79 ± 10,11 ^c
Distância Linear	634,83 ± 103,46 ^a	NA	200,32 ± 105,10 ^b	34,32 ± 21,13 ^c
Crocância Sensorial				
Valor: Escala	13,59 ± 2,08 ^a	5,02 ± 2,04 ^b	3,53 ± 4,44 ^c	0,21 ± 0,48 ^d

Nota: Os dados em cada linha com letras diferentes são significativamente diferentes (p<0,05). Os dados são apresentados como média ± desvio padrão. NA = não se aplica

Tabela 29: Propriedades acústicas das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem utilizando os filtros FIR e Arimi

Parâmetro	KMFD	Liofilização	Secagem a vácuo	Secagem convectiva
Propriedades Acústicas Filtro FIR - Perfuração				
Número de Picos Acústicos	2503 ± 404 ^a	1561 ± 701 ^b	308 ± 187 ^c	33 ± 30 ^c
SPL _{eq} (dB)	70,99 ± 3,71 ^a	59,02 ± 3,75 ^c	63,34 ± 7,86 ^b	59,06 ± 5,04 ^c
SPL _{MAX} (dB)	100,31 ± 6,34 ^a	81,45 ± 9,19 ^b	84,88 ± 15,91 ^b	70,00 ± 11,90 ^c
SPL _{Máx,10} (dB)	95,77 ± 5,61 ^a	77,32 ± 8,79 ^b	79,56 ± 14,48 ^b	64,26 ± 9,81 ^c
Propriedades Acústicas Filtro ARIMI – Perfuração				
Número de Picos Acústicos	3143 ± 494 ^a	2323 ± 686 ^b	774 ± 170 ^c	347 ± 151 ^d
SPL _{eq} (dB)	69,43 ± 4,58 ^a	58,69 ± 3,37 ^b	60,65 ± 6,84 ^b	53,89 ± 3,95 ^c
SPL _{MAX} (dB)	100,29 ± 7,62 ^a	82,81 ± 8,67 ^b	87,53 ± 15,77 ^b	71,21 ± 10,59 ^c
SPL _{Máx,10} (dB)	95,61 ± 6,78 ^a	78,78 ± 8,44 ^b	81,47 ± 14,09 ^b	65,30 ± 9,00 ^c
Propriedades Acústicas Filtro FIR - Compressão				
Número de Picos Acústicos	26104 ± 4844 ^a	NA	1003 ± 966 ^b	23 ± 22 ^b
SPL _{eq} (dB)	70,55 ± 3,21 ^a	NA	67,05 ± 9,29 ^a	52,95 ± 1,56 ^b
SPL _{MAX} (dB)	111,73 ± 4,17 ^a	NA	93,97 ± 15,92 ^b	57,70 ± 4,04 ^c
SPL _{Máx,10} (dB)	107,43 ± 3,61 ^a	NA	88,76 ± 15,94 ^b	54,24 ± 2,35 ^c
Propriedades Acústicas Filtro ARIMI – Compressão				
Número de Picos Acústicos	31545 ± 5229 ^a	NA	4793 ± 2295 ^b	3779 ± 1795 ^b
SPL _{eq} (dB)	69,89 ± 2,89 ^a	NA	59,41 ± 7,37 ^b	51,99 ± 0,49 ^c
SPL _{MAX} (dB)	112,10 ± 4,15 ^a	NA	94,31 ± 14,81 ^b	62,79 ± 4,30 ^c
SPL _{Máx,10} (dB)	108,08 ± 3,48 ^a	NA	89,41 ± 15,04 ^b	60,16 ± 3,47 ^c

Nota: Os dados em cada linha com letras diferentes são significativamente diferentes (p<0.05). Os dados são apresentados como média ± desvio padrão
 NA = não se aplica

6.3.3 Análise das Propriedades Sensoriais

Conforme apresentado na Tabela 28 o painel sensorial foi eficiente em detectar as diferenças de crocância entre todas as amostras avaliadas. O alto valor de crocância sensorial para as amostras secas por KMFD indica que este processo resultou em bananas crocantes, enquanto a secagem convectiva produziu bananas sem este atributo.

Na Tabela 30 estão descritas as diferenças entre os testes de ordenação para as amostras de bananas desidratadas por diferentes processos de secagem. Pela análise dos dados é possível constatar que as amostras foram separadas em dois grupos de preferência. Os avaliadores preferiram igualmente as amostras de bananas desidratadas pelos métodos de KMFD e liofilização, seguidas pelas amostras secas por secagem a vácuo e secagem convectiva. A secagem por KMFD demonstrou ser uma boa alternativa à liofilização, produzindo bananas desidratadas e crocantes, com grande aceitabilidade pelos consumidores, aliada a reduzidos tempos e custos de processo.

Os dados do teste de ordenação demonstraram que os avaliadores prefeririam as amostras que apresentaram maior crocância sensorial, segundo as avaliações dos painelistas treinados.

Tabela 30: Contraste das diferenças entre os totais de ordenação das amostras de bananas desidratadas por diferentes processos de secagem

	KMFD	Liofilização	Secagem a Vácuo	Secagem Convectiva
Soma Total	89^a	91^a	165^b	155^b
KMFD	-	2	76*	66*
Liofilização		-	74*	64*
Secagem a Vácuo			-	10
Secagem Convectiva				-

Nota: * significativo ao nível de 5% pelo teste de Christensen. (DMS = 33)

6.3.4 Análises das curvas de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo combinadas à análise estrutura do produto

Na Figura 29 estão descritos os gráficos de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo para os testes acústicos e mecânicos simultâneos realizados com as bananas desidratadas por diferentes processos. Escalas

de força diferentes foram utilizadas para facilitar a visualização das imagens. No APÊNDICE G encontram-se duas replicatas das curvas de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo para as bananas desidratadas por diferentes processos.

A literatura científica reporta que, produtos crocantes são caracterizados por apresentar numerosos picos de fratura acompanhados de numerosos eventos acústicos (LUYTEN; PLIJTER; VAN VLIET, 2004), ou seja, podemos afirmar que os processos de liofilização e secagem por KMFD produziram bananas com maior crocância quando comparados com os demais processos.

A Figura 30 mostra as fotos das fraturas de bananas obtidas por cada um dos processos de secagem.

Bananas desidratadas por convecção apresentaram espaços vazios maiores do que bananas liofilizadas (Figura 30 (a) e (c)) no entanto, o processo de secagem convectiva produziu bananas mais moles, com força de penetração em torno de 1,5 N. Segundo Salvador et al. (2008) certa dureza é necessária para que a crocância seja percebida, e a avaliação da Figura 29 (a) e (c) indica que a banana liofilizada é mais crocante que a banana seca por convecção.

A imagem da banana desidratada a vácuo, Figura 30 (b), indica a presença de poucos espaços vazios na estrutura do produto. O gráfico de força *versus* tempo para esta amostra, Figura 29 (b), apresenta poucos picos acústicos e mecânicos. Portanto, a banana desidratada a vácuo é um produto com baixa crocância e dura (força de penetração em torno de 65 N). Os longos tempo de processo, mesmo à baixas pressões, resultaram na compactação destas bananas.

Os gráficos de força *versus* tempo e SPL *versus* tempo indicam que a secagem por KMFD (Figura 29 (d)) produziu bananas mais crocantes do que o processo de liofilização. As amostras de bananas liofilizadas apresentaram menores espaçamentos intercelulares enquanto a secagem por KMFD produziu bananas com grandes poros, que por consequência, resultou em um produto mais crocante. Zotarelli, Porciuncula e Laurindo (2012) afirmaram em seu estudo que a liofilização tende a preservar a estrutura do produto, enquanto processos de secagem por ciclos de aquecimento com pulsos de vácuo expandem as amostras, também conhecido como efeito *puffing*. Esta característica da secagem por KMFD contribuiu para a obtenção de produtos crocantes.

Figura 29: Gráficos típicos mostrando a força *versus* tempo e SPL *versus* tempo durante a perfuração das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem (a) Secagem Convectiva, (b) Secagem a vácuo, (c) Liofilização e (d) KMFD

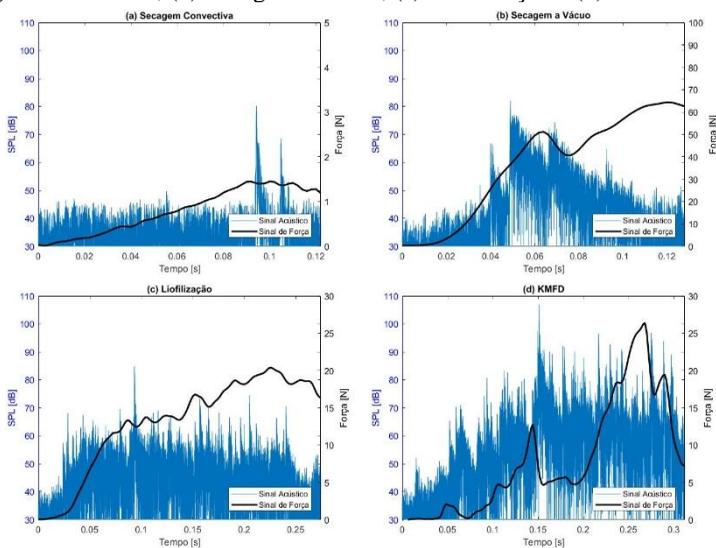
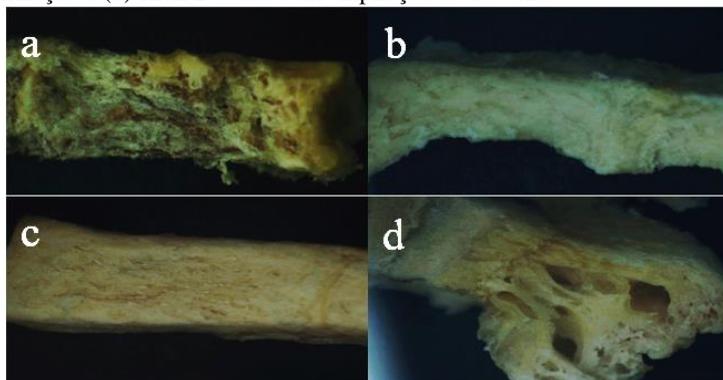


Figura 30: Imagens do estereoscópio óptico das bananas desidratadas por diferentes métodos de secagem (a) Secagem Convectiva, (b) Secagem a vácuo, (c) Liofilização e (d) KMFD todas com ampliação de 15 vezes



A Tabela 32 mostra os autovalores obtidos a partir da análise fatorial dos componentes principais. Apenas os dois primeiros fatores foram considerados na análise de componentes principais.

Tabela 32: Interpretação dos fatores para o teste de perfuração - filtro acústico FIR

Fator	Autovalor	% Variância	% Variância Acumulada
1	7,82	51,70	51,70
2	3,68	25,01	76,71
3	1,46	9,72	86,43
4	0,83	5,56	91,99
5	0,44	2,95	94,94
6	0,29	1,93	96,87
7	0,15	1,00	97,87
8	0,10	0,67	98,54
9	0,07	0,48	99,02
10	0,06	0,43	99,45
11	0,04	0,28	99,73
12	0,02	0,16	99,89
13	0,01	0,06	99,95
14	0,01	0,04	99,99
15	0,00	0,01	100,00

Nota: Rotação *Varimax*

Na Tabela 33 estão mostrados os dois componentes principais que juntos explicam 76,71% da variância total dos dados. O PC1 possui influência positiva das variáveis: porosidade, espessura, número de picos de força, número de picos acústicos, $SPL_{MÁX}$, $SPL_{MÁX,10}$ e crocância sensorial. Por outro lado, este componente principal está sendo negativamente influenciado pelas variáveis umidade e densidade aparente. É possível afirmar que o PC1 possui relação com a crocância do produto. O PC2 é positivamente influenciado pelas variáveis força máxima, força média e distância linear, indicando a relação deste eixo com a dureza do produto.

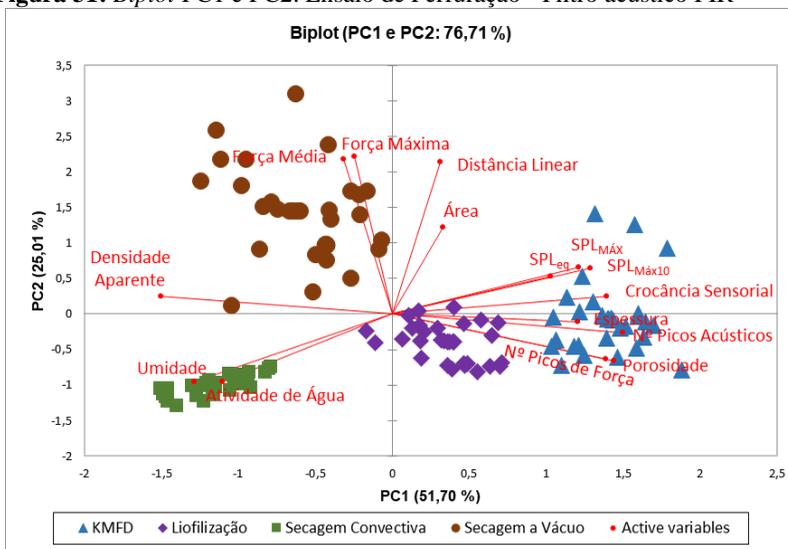
Tabela 33: Análise de componentes principais para o teste de perfuração – filtro acústico FIR

	PC1 (51,70%)	PC2 (25,01%)
Atividade de Água	-0,699	-0,418
Umidade	-0,814	-0,417
Densidade Aparente	-0,954	0,108
Porosidade	0,912	-0,288
Espessura	0,764	-0,046
Nº Picos de Força	0,877	-0,278
Força Máxima	-0,157	0,965
Força Média	-0,201	0,951
Área	0,208	0,534
Distância Linear	0,196	0,934
Nº Picos Acústicos	0,951	-0,114
SPL _{eq}	0,652	0,229
SPL _{MÁX}	0,768	0,287
SPL _{Máx10}	0,816	0,279
Crocância Sensorial	0,881	0,106

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito). Rotação *Varimax*

O *Biplot* dos dois primeiros componentes principais das bananas desidratadas por diferentes processos usando o filtro acústico FIR está apresentado na Figura 31.

Figura 31: Biplot PC1 e PC2. Ensaio de Perfuração - Filtro acústico FIR



De acordo com a Tabela 31 e a Figura 31 muitas correlações foram obtidas entre as variáveis medidas, de uma mesma propriedade e entre propriedades diferentes.

Conforme esperado foram encontradas correlações positivas entre: atividade de água e umidade ($r = 0,924$), densidade aparente e atividade de água ($r = 0,708$) e densidade aparente e umidade ($r = 0,786$) e correlações negativas entre: densidade aparente e porosidade ($r = -0,978$) e densidade aparente e espessura ($r = -0,702$).

As propriedades físicas, espessura e porosidade, apresentaram altas correlações com parâmetros mecânicos e acústicos relacionados à crocância dos produtos, foram eles: espessura e número de picos acústicos ($r = 0,729$); porosidade e número de picos de força ($r = 0,908$) e porosidade e número de picos acústicos ($r = 0,911$).

Em relação às propriedades mecânicas, força máxima, força média e distância linear, foram encontradas correlações positivas acima de 0,84 entre todos estes parâmetros, indicando a relação entre distância linear e força, e provavelmente entre distância linear e a dureza do produto.

Os parâmetros número de picos acústicos e número de picos de força, ambos frequentemente associados à crocância de produtos, também apresentaram fortes correlações entre si ($r = 0,889$).

Todos os parâmetros acústicos relacionados com intensidade sonora, SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$ e $SPL_{MÁX,10}$, apresentaram correlações acima de 0,92 entre si. As correlações entre as variáveis número de picos acústicos e $SPL_{MÁX,10}$ ($r = 0,705$) indicam que o aumento de número de picos acústicos possui relação com o aumento do nível de intensidade sonora emitido pelos 10 maiores picos acústicos.

A crocância sensorial das bananas desidratadas por diferentes métodos apresentou correlações altas com diversas propriedades físicas, mecânicas e acústicas. A porosidade das amostras levou ao aumento da crocância sensorial ($r = 0,797$), por outro lado, o aumento da umidade e da densidade aparente diminuíram a crocância sensorial do produto, conforme verificado no *biplot* para as amostras de bananas secas por convecção.

As propriedades número de picos de força e número de picos acústicos apresentaram altas correlações com a crocância sensorial, $r = 0,723$ e $r = 0,800$, respectivamente, indicando que os métodos combinados podem ser bons indicativos da crocância de bananas desidratadas por diferentes processos.

Pela avaliação do *biplot* da Figura 31 é possível afirmar que os métodos acústicos e mecânicos combinados, assim como o painel sensorial, foram capazes de detectar as diferenças de crocância entre todas as amostras avaliadas. A ordem de crocância das bananas, conforme o método de secagem foi: KMFD, Liofilização, Secagem a vácuo e Secagem convectiva.

6.3.6 Análise de correlações entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro Arimi

A Tabela 34 apresenta a matriz de correlação de Pearson entre as propriedades físicas, mecânicas, acústicas e sensoriais para o teste de perfuração utilizando o filtro Arimi. A análise da matriz indica que muitas correlações significativas foram encontradas entre as propriedades avaliadas das bananas desidratadas por diferentes processos. A análise KMO resultou no valor de 0,836, indicando que a análise fatorial pode ser realizada.

Tabela 34: Matriz de correlação de Pearson para bananas desidratadas por diferentes processo (Teste de Perfuração - Filtro acústico Arimi)

	Atividade de Água	Umidade	Densidade Aparente	Porosidade	Espessura	Nº Picos	Força	Força Máxima	Força Média	Área	Distância Linear	Nº Picos Acústicos	SPL _{eq}	SPL _{MAX}	SPL _{MIX,10}	Crocância Sensorial
Atividade de Água	1															
Umidade	0,924	1														
Densidade Aparente	0,708	0,786	1													
Porosidade	-0,572	-0,655	-0,978	1												
Espessura	-0,416	-0,540	-0,702	0,689	1											
Nº Picos Força	-0,592	-0,656	-0,907	0,908	0,647	1										
Força Máxima	-0,308	-0,294	0,230	-0,400	-0,149	-0,366	1									
Força Média	-0,305	-0,266	0,260	-0,427	-0,183	-0,392	0,986	1								
Área	-0,309	-0,321	-0,152	0,075	0,292	0,020	0,387	0,412	1							
Distância Linear	-0,489	-0,534	-0,109	-0,060	0,118	-0,071	0,893	0,846	0,468	1						
Nº Picos Acústicos	-0,685	-0,766	-0,942	0,916	0,707	0,890	-0,202	-0,234	0,126	0,112	1					
SPL _{eq}	-0,490	-0,640	-0,622	0,548	0,479	0,512	0,104	0,030	0,205	0,389	0,634	1				
SPL _{MAX}	-0,511	-0,624	-0,549	0,464	0,437	0,435	0,186	0,130	0,226	0,430	0,583	0,917	1			
SPL _{MIX,10}	-0,566	-0,682	-0,619	0,532	0,475	0,501	0,157	0,098	0,221	0,420	0,648	0,950	0,986	1		
Crocância Sensorial	-0,568	-0,741	-0,848	0,797	0,697	0,723	-0,015	-0,066	0,249	0,312	0,796	0,700	0,618	0,669	1	

Nota: As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem > 0,7 (números em negrito)

A Tabela 35 mostra os autovalores obtidos a partir da análise fatorial dos componentes principais. Apenas os dois primeiros fatores foram considerados na análise de componentes principais.

Tabela 35: Interpretação dos fatores para o teste de perfuração - filtro acústico Arimi

Fator	Autovalor	%Variância	%Variância Acumulada
1	7,97	52,31	52,31
2	3,73	25,72	78,03
3	1,22	8,16	86,19
4	0,83	5,55	91,75
5	0,45	2,98	94,73
6	0,28	1,89	96,62
7	0,15	0,97	97,59
8	0,10	0,68	98,27
9	0,09	0,59	98,86
10	0,07	0,46	99,32
11	0,05	0,34	99,66
12	0,04	0,25	99,91
13	0,01	0,04	99,95
14	0,01	0,04	99,99
15	0,00	0,01	100,00

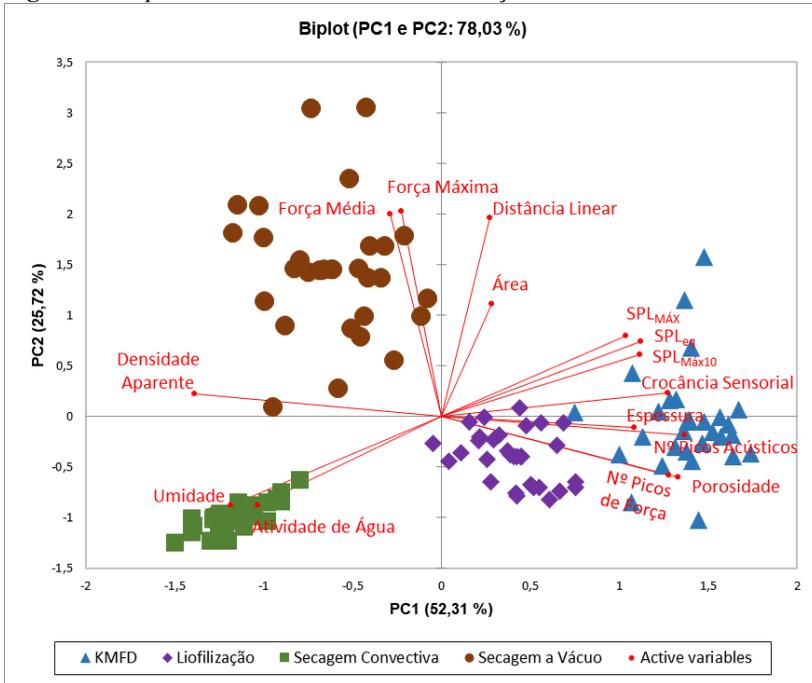
Na Tabela 36 estão descritos os dois componentes principais que juntos explicam 78,03% da variância total dos dados, indicando que os dados foram melhor explicados quando o filtro Arimi foi utilizado. O PC1 está sendo positivamente influenciado pelas variáveis: porosidade, espessura, número de picos de força, número de picos acústicos, SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$, $SPL_{MÁX,10}$ e crocância sensorial. Por outro lado, este componente principal está sendo negativamente influenciado pelas variáveis umidade e densidade aparente. O PC2 é positivamente influenciado pelas variáveis força máxima, força média e distância linear. Novamente é possível afirmar que o PC1 possui relação com a crocância do produto e o PC2 com a dureza.

Tabela 36: Análise de componentes principais para o teste de perfuração – filtro acústico Arimi

	PC1 (52,31%)	PC2 (25,72%)
Atividade de Água	-0,714	-0,417
Umidade	-0,822	-0,418
Densidade Aparente	-0,963	0,106
Porosidade	0,921	-0,285
Espessura	0,751	-0,054
Nº Picos de Força	0,885	-0,276
Força Máxima	-0,157	0,963
Força Média	-0,200	0,947
Área	0,196	0,525
Distância Linear	0,190	0,932
Nº Picos Acústicos	0,948	-0,086
SPL _{eq}	0,773	0,290
SPL _{MÁX}	0,719	0,377
SPL _{Máx,10}	0,778	0,350
Crocância Sensorial	0,882	0,108

Nota: Método de extração: Análise de componentes principais. As correlações foram levadas em consideração se seus valores absolutos fossem $> 0,7$ (números em negrito). Rotação *Varimax*

O *Biplot* dos dois primeiros componentes principais das bananas desidratadas por diferentes processos usando o filtro acústico Arimi está apresentado na Figura 32.

Figura 32: *Biplot* PC1 e PC2. Ensaio de Perfuração – Filtro acústico Arimi

A Tabela 34 e a Figura 32 indicam que a utilização do filtro acústico Arimi apresentou valores de correlações entre as variáveis muito semelhantes às obtidas utilizando o filtro FIR. No entanto, quando o filtro Arimi foi utilizado, foram encontradas diferenças de número de picos acústicos entre todas as amostras de bananas avaliadas. Dos dados da Figura 32 também é possível verificar que as amostras estão bem diferenciadas no *biplot*, ficando evidenciado o aumento da crocância das amostras com o aumento do PC1. Com os dados acústicos filtrados pelo filtro Arimi também foram encontradas correlações entre o parâmetro SPL_{eq} , relativo ao nível de pressão sonora médio dos picos acústicos, e a crocância sensorial ($r = 0,700$).

O filtro Arimi foi o mais indicado no pós-processamento dos dados acústicos de bananas desidratadas por diferentes condições de processo.

6.4 Conclusões Parciais

O pós-processamento dos dados acústicos, utilizando o filtro Arimi, explicou cerca de 78% da variância dos dados e apresentou boas correlações entre as variáveis. A análise de componentes principais resultou em dois componentes principais. O PC1, relativo à crocância dos produtos, foi influenciado por variáveis como porosidade, espessura, número de picos de força, número de picos acústicos, SPL_{eq} , $SPL_{MÁX}$, $SPL_{MÁX,10}$ e crocância sensorial. O PC2, influenciado pelas variáveis força máxima, força média e distância linear, está relacionado com a dureza das amostras.

O painel sensorial foi capaz de detectar as diferenças de crocância entre as bananas secas por diferentes processos. Propriedades como, número de picos acústicos, número de picos de força, nível de pressão sonora, porosidade e umidade apresentaram correlações elevadas com a crocância sensorial. Métodos acústicos e mecânicos combinados podem ser utilizados para determinar a crocância de bananas obtidas por diferentes métodos de secagem. O filtro Arimi é o mais indicado no pós-processamento dos dados acústicos.

A secagem por KMFD, entre as técnicas de secagem utilizadas neste estudo, mostrou ser a mais eficaz na produção de bananas crocantes, teve boa aceitação no teste sensorial e menores tempos de processo, quando comparada com a liofilização.

7. CONCLUSÕES

O sistema de aquisição de dados acústicos em alta frequência pode ser acoplado ao texturômetro. A utilização de uma câmara semi-anecoica, isolando o texturômetro e o microfone, é necessária para atenuar ruídos externos durante as medições simultâneas, acústicas e mecânicas. O posicionamento do microfone a 5 cm de distância e com um ângulo de 45° em relação à *probe* mecânica é o mais indicado para a realização dos experimentos. A utilização de filtros acústicos, no pós-processamento dos dados, é eficaz na atenuação de ruídos provocados pelo motor e caixa de engrenagens do texturômetro.

O painel sensorial, treinado quanto ao atributo de crocância, construiu uma nova escala de crocância utilizando os padrões da escala *Spectrum*. A crocância dos padrões, avaliada por medidas acústicas e mecânicas, indicam boas correlações entre número de picos de força, número de picos acústicos e SPL_{eq} com ambas as escalas sensoriais, durante ensaios de compressão. Os filtros acústicos, FIR e Arimi, podem ser utilizados para a filtragem do ruído do texturômetro, sem alterações nas correlações entre os parâmetros avaliados. Os parâmetros acústicos e mecânicos não conseguem diferenciar as amostras com crocâncias intermediárias da escala sensorial.

As bananas, secas por KMFD, utilizando diferentes parâmetros de processo, apresentam crocâncias muito parecidas, apenas o processo de secagem a temperatura de 70 °C com aplicação de um pulso de vácuo produz bananas mais crocantes, que são percebidas tanto pelas variáveis acústicas e mecânicas, quanto pelo painel sensorial e preferidas pelos avaliadores. Nenhum dos métodos de determinação de crocância consegue diferenciar as demais amostras. O método estatístico PCA, utilizando dois componentes principais, explica pouco a variância dos resultados (cerca de 63%) e as correlações entre as variáveis acústicas e mecânicas e as variáveis sensoriais são fracas, independente do filtro acústico utilizado.

A utilização de diferentes processos de secagem resulta em bananas com crocâncias diferentes. O painel sensorial é eficiente em detectar as diferenças de crocância entre as amostras, assim como as análises acústicas e mecânicas combinadas. Variáveis como, número de picos acústicos, número de picos de força e porosidade apresentam correlações acima de 0,7 com a crocância sensorial e podem ser utilizadas para determinar a crocância de bananas obtidas por diferentes processos. O filtro acústico Arimi é o mais indicado na filtragem dos dados acústicos de bananas desidratadas por diferentes processos. O método de secagem

KMFD produz bananas com elevada crocância sensorial, alta porosidade e numerosos picos acústicos e mecânicos, durante ensaios de perfuração. Bananas secas por KMFD são tão preferidas pelos consumidores, quanto as bananas liofilizadas.

Os estudos de caso indicam que o aparato experimental construído para realizar medidas mecânicas e acústicas simultâneas é tão eficiente quanto o painel sensorial em determinar a crocância de bananas texturizadas. A alta taxa de aquisição de dados acústicos alcançada e o menor custo em relação ao AED, representa uma interessante alternativa às soluções comerciais existentes.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparar a alta taxa de aquisição de dados acústicos com soluções comerciais como o AED e verificar a influência da maior taxa na correlação com dados sensoriais.

- Estudar a correlação de outros parâmetros acústicos com a resposta sensorial, como por exemplo: tamanho médio dos picos acústicos, duração e frequência do som emitido (FFT - *Fast Fourier Transformation*) e forma do sinal acústico (análise fractal).

- Gravar o som emitido durante as análises sensoriais dos produtos. Correlacionar os parâmetros acústicos obtidos durante a análise sensorial com os parâmetros acústicos obtidos durante a fratura mecânica.

- Testar outros tipos de produtos e *probes*.

- Testar outras configurações de filtros acústicos.

REFERÊNCIA

- AGUILERA, J. M. Drying and dried products under the microscope. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 3, p. 137-143, 2003.
- AGUILERA, J. M. Why food microstructure? **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 1-2, p. 3-11, 2005.
- AGUILERA, J. M.; STANLEY, D. W. **Microstructural principles of food processing and engineering**. 2nd ed. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers, 1999.
- AL CHAKRA, W.; ALLAF, K.; JEMAI, A. Characterization of brittle food products: Application of the acoustic emission method. *Journal of Texture Studies*, v.27, n. 3, p. 327–348, 1996.
- ANDRADE, A. O. E.; SOARES, A. B. **Técnica de janelamento de sinais**. Disponível em: <<http://www.laps.ufpa.br/professores/valquiria/uploadsaves/ajax/1/file/2013-01-23-12:55:29.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2018.
- AOAC. **Official methods of analysis of the Association Analytical Chemists**. 18th.ed. Gaithersburg, Maryland, 2005.
- ARGYROPOULOS, D.; HEINDL, A.; MULLER, J. Assessment of convection, hot-air combined with microwave-vacuum and freeze-drying methods for mushrooms with regard to product quality. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 46, n. 2, p. 333-342, 2011.
- ARIMI, J. M.; DUGGAN, E.; O’SULLIVAN, M.; LYNG, J. G.; O’RIORDAN, E. D. Development of an acoustic measurement system for analyzing crispiness during mechanical and sensory testing. **Journal of Texture Studies**, v. 41, n. 3, p. 320–340, 2010.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of Foods**. New York: Chapman and Hall, 1997. 330 p.
- BLONSKA, A.; MARZEC, A.; BLASZCZYK, A. Instrumental evaluation of acoustic and mechanical texture properties of short-dough

biscuits with different content of fat and inulin. **Journal of Texture Studies**, v. 5, n. 3, p. 226-234, 2014.

BOURNE, M.C. **Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement**. New York: Academic Press, 2002. 427 p.

BOUROCHE, J. M.; SAPORTA, G. Análise de dados. Rio de Janeiro: Zahar, 1982. 117 p.

BRENNAN, J. G. Food texture measurement. In: **Development in Food Analysis Techniques**, R. D. King, ed. Applied Science Publishers: London, 1980 v. 2. p. 1–78.

CARR, J. J. **Linear IC applications: A designer's handbook**. Oxford: Butterworth Heinemann. 1996. 356 p.

CARTAXO, A. J. F. M. **Caracterização de Filtros Acústicos Baseada no Método dos Elementos Finitos**. 2007, 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

ÇARŞANBA, E.; DUERRSCHMID, K.; SCHLEINING, G. Assessment of acoustic-mechanical measurements for crispness of wafer products. **Journal of Food Engineering**, v. 5, n. 8, p. 327-345, 2017.

CASTRO-PRADA, E. M.; LUYTEN, H.; LICHTENDONK, W.; HAMER, R.J.; VLIET, T. V. An improved instrumental characterization of mechanical and acoustic properties of crispy cellular solid food. **Journal of Texture Studies**, v. 38, n. 6, p. 698–724, 2007.

CATTEL, R. B. The scree test for the number of factors. **Multivariate behavior research**, v.1, p. 245-276, 1966.

CHANVRIER, H.; JAKUBCZYK, E.; GONDEK, E.; GUMY, J.C. Insights into the texture of extruded cereals: Structure and acoustic properties. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 24, p. 61–68, 2014.

CHAUNIER, L.; COURCOUX, P.; DELLA VALLE, G.; LOURDIN, D. Physical and sensory evaluation of cornflakes crispness. **Journal of Texture Studies**, v. 36, n. 1, p. 93–118, 2005.

CHEN, J.; ENGELEN, L. **Food Oral Processing: Fundamentals of Eating and Sensory Perception**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012. 408 p.

CHEN, J.; KARLSSON, C.; POVEY, M. Acoustic envelope detector for crispness assessment of biscuits. **Journal of Texture Studies**, v. 36, n. 2, p. 139–156, 2005.

CHEN, X. D.; MUJUMDAR, A. S. **Drying Technologies in Food Processing**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2008. 352 p.

CHEN, L.; OPARA, U. L. Texture measurement approaches in fresh and processed foods: A review. **Food Research International**, v. 51, n. 2, p. 823–835, 2013.

CHRISTENSEN, C. M.; VICKERS, Z. M. Relationships of chewing sounds to judgments of food crispness. **Journal of Food Science**, v. 46, n. 2, p. 574–578, 1981.

CIVILLE, G. V.; SZCZESNIAK, A. S. Guidelines to training a texture profile panel. **Journal of Texture Studies**, v. 4, n. 2, p. 204 – 223, 1973.

CIVILLE, G. V. **Selection and training of descriptive texture analysis panel**. Personal Communication, 1984.

COSTA, F.; CAPPELLIN, L.; LONGHI, S.; GUERRA, W., MAGNAGO, P.; PORRO, D.; SOUKOULIS, C.; SALVI, S.; VELASCO, R., BIASIOLI, F.; GASPERI, F. Assessment of apple (*Malus × domestica* Borkh.) fruit texture by a combined acoustic-mechanical profiling strategy. **Postharvest biology and technology**, v. 61, n. 1, p. 21–28, 2011.

CRUZ, I. C. TOPA, M. C. **Análise multivariada como ferramenta de gerenciamento de fornecedores visando um relacionamento com vantagem competitiva**, 2009. 82f. Monografia (Graduação em Estatística) Curso de Bacharelado em Estatística, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

CYBULSKA, J.; PIECZYWEK, P. M.; ZDUNEK, A. The effect of Ca²⁺ and cellular structure on apple firmness and acoustic emission. **Food Research and Technology**, v. 235, p. 119-128, 2012.

DACREMONT, C. Spectral composition of eating sounds generated by crispy, crunchy and crackly foods. **Journal of Texture Studies**, v. 26, n. 2, p. 27–43, 1995.

DACREMONT, C.; COLAS, B.; SAUVAGEOT, F. Contribution of air - and bone - conduction to the creation of sounds perceived during sensory evaluation of foods. **Journal of Texture Studies**, v. 22, n. 4, p. 443 – 456, 1991.

DANTAS, L. L.; SHEPHERD, K.; OLIVEIRA E SILVA, S. D.; SOARES FILHO, W. D. S. Classificação botânica, origem, evolução e distribuição geográfica. In: ALVES, E. J. (Org.). **A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa SPI; Cruz das Almas: Embrapa-CNPMP, 1997. 587 p.

DIJKSTERHUIS, G.; LUYTEN, H.; DE WIJK, R.; MOJET, J. A new sensory vocabulary for crisp and crunchy dry model foods. **Food Quality and Preference**, v. 18, n. 1, p. 37–50, 2007.

DOGAN, H.; KOKINI, J. L. Psychophysical markers for crispness and influence of phase behavior and structure. **Journal of Texture Studies**, v. 38, n. 3, p. 324–354, 2006.

DRAKE, B. K. Food crushing sounds. An introductory study. *Journal of Food Science*, v. 28, p. 233–241, 1963.

DUIZER, L. M.; CAMPANELLA, O. H.; BARNES, G. R. G. Sensory, instrumental and acoustic characteristics of extruded snack food products. **Journal of Texture Studies**, v. 29, n. 4, p. 397–411, 1998.

DUIZER, L. A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, n. 1, p. 17–24, 2001.

EDMISTER, J. A.; VICKERS, Z. M. Instrumental acoustical measures of crispness in foods. **Journal of Texture Studies**, v. 16, n. 2, p.153–167, 1985.

EMBRAPA. **Base de dados dos produtos**. Disponível em <http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/Brasil/Banana/banana_brasil.htm> Acessado em: 15 de agosto de 2017.

FAOSTAT. **Agricultural production, primary crops**. Disponível em <<http://www.fao.org/faostat/en/?#data/QC>>. Acessado em: 17 novembro 2017.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

FENG, H.; TANG, J. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 4, p. 679-683, 1998.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos**. Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Bauru, 2002 (Apostila de acústica e ruídos). Disponível em: <http://resgatebrasilvirtual.com.br/moodle/file.php/1/E-book/Materiais_para_Download/Ruido/Apostila%20de%20Ruido%20I.pdf>. Acesso em: 02 dezembro 2017.

FERREIRA, JR. S.; BAPTISTA, A. J. M. S.; LIMA J. E. A modernização agropecuária nas microrregiões do Estado de Minas Gerais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, 2004.

FOEGEDING, E. A.; ÇAKIR, E.; KOÇ, H. Using dairy ingredients to alter texture of foods: Implications based on oral processing considerations. **International Dairy Journal**, v. 20, n. 9, p. 562–570, 2010.

FRENCH, M. R.; HANDY, R. G. Spectrograms: turning signals into pictures. **Journal of Engineering Technology**, v. 24, n. 1, p. 32–35, 2007.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3rd. ed., Inc. Prentice Hall: New Jersey. 1993. 921 p.

GIACOSA, S.; BELVISO, S.; BERTOLINO, M.; DAL BELLO, B.; GERBI, V.; GHIRARDELLO, D.; GIORDANO, M.; ZEPPA, G.; ROLLE, L. Hazelnut kernels (*Corylus avellana* L.) mechanical and acoustic properties determination: Comparison of test speed, compression or shear axis, roasting, and storage condition effect. **Journal of Food Engineering**, v.173, p. 59-68, 2016.

GONDEK, E.; LEWICKI, P. P.; RANACHOWSKI, Z. Influence of water activity on the acoustic properties of breakfast cereals. **Journal of Texture Studies**, v. 37, n. 5, p. 497–515, 2006.

GREGSON, C. M. Evaluation of numerical algorithms for the changes in texture over time for instrumental measurement of bowl-life and ready-to-eat breakfast cereals. **Journal of Texture Studies**, v. 33, n. 6, p. 505–528, 2002.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

HÄRDLE, W.; SIMAR, L. **Applied multivariate statistical analysis**. 2nd. ed. Berlin: Springer, 2007. 458 p.

IAZZETTA, F. **Filtros**. Disponível em :
<<http://www2.eca.usp.br/prof/iazzetta/tutor/audio/filtros/filtros.html>>
Acesso em: 15 dezembro 2017.

IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Unit operations in food engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2003. 873 p.

IBGE. **Pesquisa industrial anual**. Disponível em:
<<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?&t=downloads>>. Acesso em: 19 novembro 2017

IGLESIAS, B. D.; VALERO, C.; RAMOS, F. J. G.; ALTISENT, M. R. Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods. **Journal of food engineering**, v. 77, n. 4, p. 926-935, 2006.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. Brasília: Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2005. 1018 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5492-4: **Sensory analysis vocabulary**. Geneva, 1981.

IWATANI, S.; YAKUSHIJIB, H., MITANIB, N.; SAKURAI, N. Evaluation of grape flesh texture by an acoustic vibration method. **Postharvest Biology and Technology**, v. 62, n. 3, p. 305–309, 2011.

JAKUBCZYK, E.; GONDEK, E. M.; TRYZNO, E. Application of novel acoustic measurement techniques for texture analysis of coextruded snacks. **LWT-Food Science and Technology**, v. 75, p. 582–589, 2017.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 1992. 642 p.

KILCAST, D. **Texture in food: Solid foods**. v.2. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 2004. 537 p.

KILCAST, D. **Instrumental assessment of food sensory quality: A practical guide**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 2013. 627 p.

KUROZAWA, L. E.; HUBINGER, M. D.; PARK, K. J. Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. **Journal of Food Engineering**, v. 108, n. 1, p. 43-50, 2012.

KWAK, H. S.; CHANG, Y. H.; LEE, Y. Estimation of crispness and consumer acceptance of fried potato chips by mechanical and acoustic measurements. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 500–506, 2015

LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 856 p.

LAURINDO, J. B.; PELEG, M. Mechanical measurements in puffed rice cakes. **Journal of Texture Studies**, v. 38, n. 5, p. 619-634, 2007.

LAURINDO, J. B.; PELEG, M. Mechanical characterization of shredded wheat. **Journal of Texture Studies**, v. 39, n. 5, p. 444-459, 2008.

LAURINDO, J.B., PORCIUNCULA, B.D.A., ZOTARELLI, M.F. **Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes**. Brazilian Patent, 2011, PI 1107173-7.

LAWLESS, H. L.; HEYMANN, H. **Sensory evaluation of food: principles and practices**. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1998.

LAWLESS, H. T., HEYMANN, H. **Sensory evaluation of food: principles and practices**. 2nd ed. New York: Springer, 2010. 596 p.

LAZZARINI, V. E. P. Elementos de Acústica, Music Department National University of Ireland, Maynoot, 1998. (Apostila de acústica). Disponível em: < http://hugoribeiro.com.br/biblioteca-digital/Lazzarini-Elementos_Acustica.pdf>. Acesso em 04 dezembro 2017.

LIMA, M.B.; SILVA, S.O.; FERREIRA, C.F. **Banana. O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa, 2012. 214 p.

LIMA, M. M. D.; TRIBUZI, G.; SOUZA, J. A. R. D.; SOUZA, I. G. D.; LAURINDO, J. B.; CARCIOFI, B. A. M. Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified pineapple snacks. **LWT - Food Science and Technology**, v. 72, p. 501–509, 2016.

LINK, J. V.; TRIBUZI, J.; LAURINDO, J. B. Conductive multi-flash drying of mango slices: Vacuum pulse conditions on drying rate and product properties. **Journal of Food Processing and Preservation**. 2017; e13440.

LINK, J. V.; TRIBUZI, J.; LAURINDO, J. B. Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. **LWT - Food Science and Technology**, v. 84, p. 717-725, 2017b.

LIU, G.; CHEN, J.; LIU, M.; WAN, X. Shrinkage, porosity and density behavior during convective drying of bio-porous material. **Procedia Engineering**, v. 31, p. 634 – 640, 2012.

LIU, X. Q.; TAN, J. L. Acoustic wave analysis for food crispness evaluation. **Journal of Texture Studies**, v. 30, n. 4, p. 397–408, 1999.

LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. **Journal of Food Science**, v. 45, p. 1403–1407, 1980.

LUYTEN, H., PLIJTER, J. J.; VAN VLIET, T. Crispy/crunchy crusts of cellular solid foods: A literature review with discussion. **Journal of Texture Studies**, v. 35, n. 5, p. 445–492, 2004.

LUYTEN, H.; VAN VLIET, T. Acoustic emission, fracture behavior and morphology of dry crispy foods: A discussion article. **Journal of Texture Studies**, v. 37, n. 3, p. 221–240, 2006.

MADIOULI, J.; LECOMTE, D.; NGANYA, T.; CHAVEZ, S.; SGHAIER, J.; SAMMOUDA, H. A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. **Drying Technology**, v. 25, n. 4, p. 621-628, 2007.

MARDIA, K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. **Multivariate analysis**. London: Academic, 1979.

MARKS, L. E. On associations of light and sound: the mediation of brightness, pitch and loudness. **American Journal of Psychology**, v. 87, n.1-2, p. 173-188, 1974.

MARZEC, A.; LEWICKI, P. P.; RANACHOWSKI, Z. Influence of water activity on acoustic emission of flat extruded bread. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 2, p. 410-422, 2007.

MARZEC, A.; KOWALSKA, H.; PASIK, S. Mechanical and acoustic properties of dried apples. **Journal of Fruit and Ornamental Plant Research**, v. 17, n. 2, p. 127-137, 2009.

MASKAN, M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering**, v. 44, n. 2, p. 71-78, 2000.

MATSUURA, F. C. A. U.; COSTA, J. I. P. da; FOLEGATTI, M. I. da S. Marketing de banana: preferências do consumidor quanto aos atributos de qualidade dos frutos. **Revista Brasileira da Fruticultura**, v. 26, n. 1, p. 48-52, 2004

MEILGAARD, M.C.; CIVILLE, G.V.; CARR, B.T. **Sensory evaluation techniques**. New York: CRC Press, 2007. 304 p.

MEULLENET, J. F.; FINNEY, M. L. Measurement of biting velocities, and predetermined and individual crosshead speed instrumental imitative

tests for predicting cheese hardness. **Journal of Texture Studies**, v. 33, n.1, p. 45-58, 2002

MINGOTTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MINIM, V.P. R. **Análise sensorial: estudos com consumidores**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013.

MOHAMED, A. A. A.; JOWITT, R. BRENNAN, J. G. Instrumental and sensory evaluation of crispness. I. In friable foods. **Journal of Food Engineering**, v. 1, n. 1, p. 55–75, 1982.

MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 178, p. 1-11, 2006.

MOORE, B. J. **An introduction to the psychology of hearing**. London: Academic Press, 1982.

MUÑOZ, A. M. Development and application of texture reference scale. **Journal of Sensory Studies**, v. 1, n. 1, p. 55-86, 1986.

MUÑOZ, A. M.; CIVILLE, G. V. **The Spectrum descriptive analysis method**. In HOOTMAN, R. C. Manual on descriptive analysis testing for sensory evaluation. Baltimore, 1992. p. 22-37.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1312 p.

MUÑOZ, A. M.; CIVILLE, G. V. Universal, product and attribute specific scaling and the development of common lexicons in descriptive analysis. **Journal of Sensory Studies**, v. 13, n. 1, p.57-75, 1998.

MURTA, B. H., AGUIRRE, S.; PAUL, S. Projeto, construção e caracterização de clausura para ensaios acústicos na indústria alimentícia. In ENCONTRO SOBRAC SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 27, Brasília, 2017. **Anais...** Brasília, 2017. p. 1129-1137.

NAES, T.; BROCKHOFF, P. B.; TOMIC, O. **Statistics for sensory and consumer science**. Wiltshire: Wiley, 2010.

OIKONOMOPOULOU, V. P.; KROKIDA, M. K.; KARATHANOS, V. T. The influence of freeze drying conditions on microstructural changes of food products. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 647 – 654, 2011.

ONUKE, D. M. **Sistema de análise em frequência de filtros analógicos**. 2005. 59 f. Monografia (Conclusão de curso em Engenharia da Computação) – Faculdade de Engenharia da Computação, Centro Universitário Positivo – UnicenP, Curitiba, 2005.

PAENKANYA, S.; SOPONRONNARIT, S.; NATHAKARANAKULE, A. Application of microwaves for drying of durian chips. **Food and Bioproducts Processing**, v. 96, p. 1–11, 2015.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas. p.47-51, 2007.

PAUL, S. **Conceitos básicos de física acústica Aula 3**. Florianópolis. 2017. 46 slides.

PEREIRA, J. C. R. **Análise de Dados Qualitativos – Estratégias Mercadológicas para as Ciências da Saúde, Humanas e Sociais**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

PIAZZA, L.; GIGLI, J.; BALLABIO, D. On the application of chemometrics for the study of acoustic-mechanical properties of crispy bakery products. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 86, n. 1, p. 52–59, 2007.

PIAZZA, L.; GIGLI, J.; BENEDETTI, S. Study of structure and flavour release relationships in low moisture bakery products by means of the acoustic-mechanical combined technique and the electronic nose. **Journal of Cereal Science**, v. 48, n. 2, p. 413-419, 2008.

PIAZZA, L.; GIOVENZANA, V. Instrumental acoustic-mechanical measures of crispness in apples. **Food Research International**, v. 69, p. 209–215, 2015.

PONTES, P. A. L.; VIEIRA, V. P.; GONÇALVES, M. I. R.; PONTES, A. A. L. Características das vozes roucas, ásperas e normais: análise acústica espectrográfica comparativa. **Revista Brasileira de Otorrinolaringologia**, v. 68, n. 2, p.182-8, 2002.

PORCIUNCULA, B. D. A. **Desenvolvimento de processo integrado de desidratação e modificação da textura de banana (var. prata) por secagem convectiva e pulsos de vácuo**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for Controlling the Structure and Texture of Dehydrated Banana. **Drying Technology**, v. 34, p.167-176, 2016.

PRIMO-MARTIN, C.; CASTRO-PRADA, E. M.; MEINDERS, M. B. J.; VEREIJKEN, P. F. G.; VAN VLIET, T. Effect of structure in the sensory characterization of the crispness of toasted rusk roll. **Food Research International**, v. 41, n. 5, p. 480–486, 2008.

QUEIROZ, M. C.; TREPTOW, R. O. Análise sensorial para avaliação da qualidade dos alimentos. Rio Grande: Ed. da FURG, 2006. 268 p.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 311-319, 2001.

REGAZZI, A. J. **INF 766 - Análise multivariada**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. 166p. (Apostila de disciplina).

ROUDAUT, G.; DACREMONT, C.; PAMIES, B.V.; COLAS, B.; LE MESTE, M. Crispness: A critical review on sensory and material science approaches. **Trends in Food Science and Technology**, v. 13, n. 6–7, p. 217– 227, 2002.

SAGAR, V. R.; SURESH, K. P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 1, p.15-26, 2010.

SAELEAW, M.; DÜRRSCHMID, K.; SCHLEINING, G. The effect of extrusion conditions on mechanical, sound and sensory evaluation of rye expanded snack. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 4, p. 532-540, 2012.

SAELEAW, M.; SCHLEINING, G. Effect of frying parameters on crispiness and sound emission of cassava crackers. **Journal of Food Engineering**, v. 103, n. 3, p. 229– 236, 2011.

SALVADOR, A.; VARELA, P.; SANZ, T.; FISZMAN, S. M. Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis. **LWT-Food Science and Technology**, v. 42, n. 3, p. 763–767, 2009.

SANZ, T.; PRIMO-MARTÍN, T.; VLIET, T. Characterization of crispness of French fries by fracture and acoustic measurements, effect of pre-frying and final frying times. **Food Research International**, v. 40, n. 1, p. 63–70, 2007.

SAUVAGEOT, F.; BLOND, G. Effect of water activity on crispness of breakfast cereals. **Journal of Texture Studies**, v. 22, n. 4, p. 423–442, 1991.

SCANDELARI, L. **Apostila de filtros digitais**. Disponível em <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/scandelari/laboratorio-de-pds/filtros.pdf/view>> Acesso em: 14 janeiro 2018a.

SCANDELARI, L. **Experiência Filtros FIR**. Disponível em <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/scandelari/laboratorio-de-pds/LAB%20PDS%20-%20FIR.pdf/view>> Acesso em 14 de janeiro 2018b.

SCOTT, C. L.; DOWNEY, R. G. Types of food aversions: animal, vegetable, and texture. **The Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied**, v. 141, n. 2, p.127–134, 2007.

SELF, D. **Audio Engineering Explained**. London: Focal Press. 2010. 639 p.

SERENO, A. M.; SILVA, M. A.; MAYOR, L. Determination of particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content. **International Journal of Food Properties**, v. 10, p. 455–469, 2007.

SEYMOUR, S. K.; HAMANN, D. D. Crispness and crunchiness of selected low moisture foods. *Journal of Texture Studies*, v. 19, n. 1, p. 79–95, 1988.

SHIN, K.; HAMMOND, J. **Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers**. Chichester: Wiley. 2008. 403 p.

SILVA, C. A. B.; STRINGHETA, P. C.; FERNANDES, A. R.; MELONI, P. L. S. Produção de banana passa. Brasília: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria do Desenvolvimento Rural, **Série Perfis Agroindustriais**, v. 5, p. 32, 1995.

SPEARMAN, C. “General Intelligence,” Objectively Determined and Measured. **American Journal of Psychology**, v. 15, n. 2, p. 201-292, 1904.

STABLE MICRO SYSTEM. **Acoustic envelope detector**. Disponível em <https://www.stablemicrosystems.com/AcousticEnvelopeDetector.html>. Acesso em: 20 janeiro 2018.

STONE, H.; SIDEL, J. L. **Sensory evaluation practices**. 3rd ed. New York: Academic. 2004.

SZCZESNIAK, A. S. The meaning of textural characteristics – crispness. **Journal of Texture Studies**, v. 19, n. 1, p. 51–59, 1988.

SZCZESNIAK, A. S. Texture: is it still an overlooked attribute?. **Food Technology**, v. 9, p. 86–95, 1990.

SZCZESNIAK, A.; KLEIN, D. Consumer awareness of texture and other food attributes. **Food Technology**, v. 63, p. 74–77, 1963.

TANIWAKI, M.; HANADAB, T.; TOHROC, M.; SAKURAI, N. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and

their texture measurements using acoustical vibration techniques. **Postharvest Biology and Technology**, v. 51, p. 305-310, 2009.

TANIWAKI, M.; KOHYAMA, K. Mechanical and acoustic evaluation of potato chip crispness using a versatile texture analyzer. **Journal of Food Engineering**, v.112, n. 4, p. 268– 273, 2012.

TESCH, R.; NORMAND, M.D., PELEG, M. Comparison of the acoustic and mechanical signatures of two cellular crunchy cereal foods at various water activity levels. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 70, n. 3, p. 347-354, 1996.

TUNICK, M. H.; ONWULATA, C. I.; THOMAS, A. E.; PHILLIPS, J. G.; MUKHOPADHYAY, S.; SHEEN, S.; LIU, C. K.; LATONA, N.; PIMENTEL, M. R.; COOKE, P. H. Critical evaluation of crispy and crunchy textures: a review. **International Journal of Food Properties**, v. 16, n. 5, p. 949-963, 2013.

VARELA, P.; CHEN, J.; FISZMAN, S. M.; POVEY, M. Crispness assessment of roasted almonds by an integrated approach to texture description: texture, acoustics. **Journal of Chemometrics**, v. 20, n. 6-7, p. 311–320, 2006.

VARNALIS, A. I.; BRENNAN, J. G.; MACDOUGALL, D. B. A proposed mechanism of high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 361–367, 2001.

VIBRASOM. **Tabela de pressão sonora**. Disponível em <<https://www.vibrasom.ind.br/produtos-acusticos/tabela-pressao-sonora-sonique.php>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2017.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 f. Monografia (Especialização em Estatística). Departamento de Estatística. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul: Santa Maria, 2005.

VICKERS, Z. M. Development of a psychoacoustical theory of crispness. **Dissertation abstracts international. B, Sciences and engineering**, v. 36, n. 11, p. 76–9575, 1976.

VICKERS, Z. M. Relationships of chewing sounds to judgments of crispness, crunchiness and hardness. **Journal of Food Science**, v. 47, n. 1, p.121–124, 1982.

VICKERS Z. M. Crispness and crunchiness – a difference in pitch? **Journal of Texture Studies**, v. 15, n. 2, p. 157–63, 1984.

VICKERS, Z. M. Sensory, acoustical, and force–deformation measurements of potato-chip crispness. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 1, p.138–140, 1987a.

VICKERS, Z. M. Crispness and crunchiness – textural attributes with auditory components. In: H. R. MOSKOWITZ **Food Texture: Instrumental and Sensory Measurement**. New York: Dekker, 1987b. p. 145–166.

VICKERS, Z., BOURNE, M. C. A psycho-acoustic theory of crispness. **Journal of Food Science**, v. 41, p. 1158–1164, 1976.

VINCENT, J. F. V. The quantification of crispness. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 78, n. 2, p.162–168, 1998.

VOISEY, P. W. Engineering assessment and critique of instruments used for meat tenderness evaluation. **Journal of Texture Studies**, v. 7, p. 11–48, 1976

VON LOESECKE, H. **Bananas**. 2nd. ed. New York: InterScience, 1950.

WIKTOR, A.; GONDEK, E.; JAKUBCZYK, E.; NOWACKA, M.; DADAN, M.; FIJALKOWSKA, A.; WITROWA-RAJCHERT, D. Acoustic emission as a tool to assess the changes induced by pulsed electric field in apple tissue. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 37, p. 375-383, 2016.

ZDUNEK, A.; FRANKEVYCH, L.; KONSTANKIEWICZ, K.; RANACHOWSKI, Z. Comparison of puncture test, acoustic emission and spatial-temporal speckle correlation technique as methods for apple quality evaluation. **Acta Agrophysica**, v. 11, n. 1, p. 303-315, 2008.

ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A. S.; WANG, S. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 10, p. 524-534, 2006.

ZOTARELLI, M. F.; PORCIUNCULA, B. D. A.; LAURINDO, J. B. A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 108, p. 523-531, 2012.

APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO DE PRÉ-SELEÇÃO

História

Nome:

Endereço:

Telefone:

e-mail:

Tempo

Em quais dias da semana e período (manhã e/ou tarde) você não poderia participar do treinamento?

Você pretende tirar férias de 03/03/2017 a 14/04/2017?

Qual é a sua data prevista de término das atividades no programa de pós-graduação em engenharia de alimentos?

Saúde

Você possui alguns dos itens listados abaixo? Responda sim ou não.

Dentadura _____

Diabetes _____

Doença bucal ou de gengiva _____

Hipoglicemia _____

Alergias alimentares _____

Hipertensão _____

Você está tomando alguma medicação que afete seus sentidos, especificamente gosto e cheiro? _____

Hábitos Alimentares

Você está atualmente em uma dieta restrita? Se sim, explique.

Com que frequência você come fora por mês?

Com que frequência você come “fast foods” fora por mês?

Com que frequência no mês você come refeições congeladas?

Quais são seus alimentos favoritos?

Quais são seus alimentos menos favoritos?

Quais alimentos você não pode comer?

Quais alimentos você não gosta de comer?

Como é sua sensibilidade às características de textura em alimentos?

Assinale a resposta que melhor se adéqua.

Melhor que a média _____

Média _____

Pior que a média _____

Alguém na sua família imediata trabalha para uma indústria de alimentos?

APÊNDICE B - QUESTIONÁRIO DE TEXTURA**Nome:****Data:** / /

- 1) Como você descreveria a diferença entre gosto e textura?
- 2) Descreva algumas propriedades de textura de alimentos em geral.
- 3) Descreva algumas das partículas encontradas em alimentos.
- 4) Descreva algumas das propriedades que aparecem quando você mastiga um alimento.
- 5) Descreva a diferença entre “crispy” e “crunch”.
- 6) Quais são algumas das propriedades de textura da batata chips?
- 7) Quais são algumas das propriedades de textura da margarina?
- 8) Quais são algumas das propriedades de textura da barra de cereal?
- 9) Quais são algumas das propriedades de textura do pão?
- 10) Para quais tipos de produtos a textura é importante?

APÊNDICE C - FICHA DE AVALIAÇÃO DE CROCÂNCIA

Nome:

Data: / /

Morda as amostras com os dentes molares e marque com um traço vertical nas escalas abaixo a posição que melhor identifica a intensidade da crocância de cada uma das amostras.

Código da amostra:



Código da amostra:



Código da amostra:



Código da amostra:



Código da amostra:



APÊNDICE D – FICHA PARA O TESTE DE PREFERÊNCIA

Nome:

Data: / /

Idade:

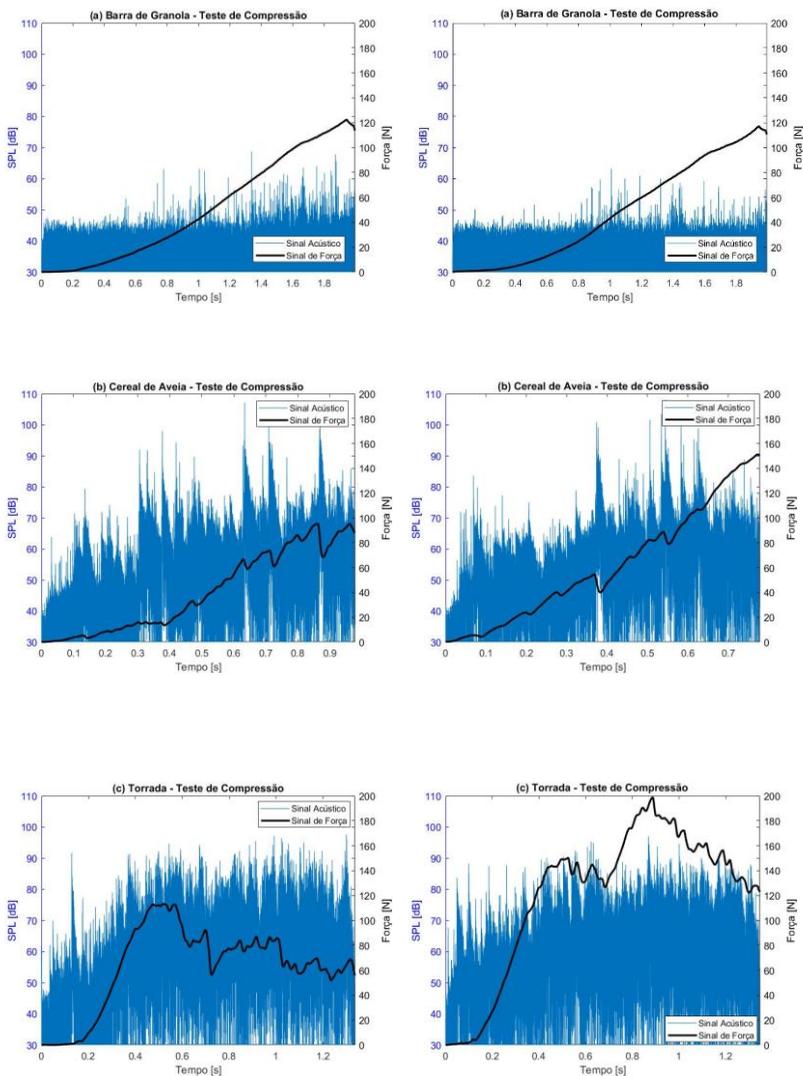
Teste de Ordenação de Preferência

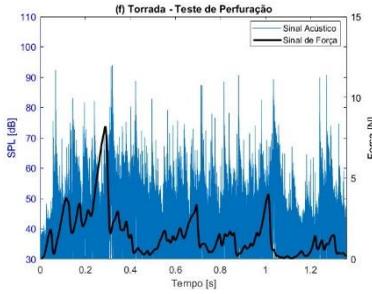
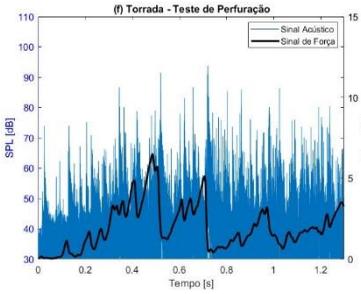
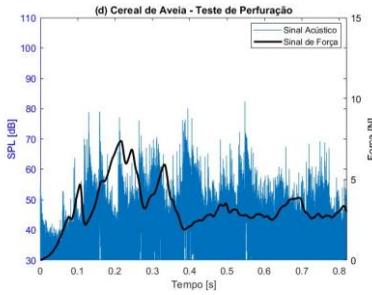
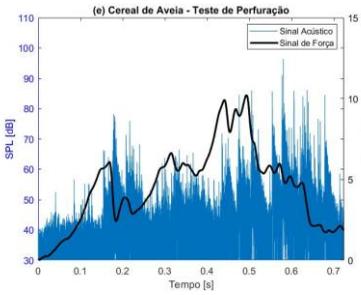
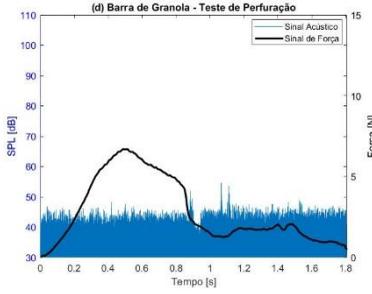
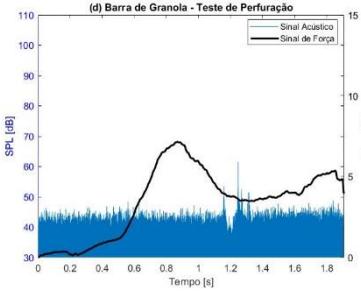
1. Você está recebendo quatro amostras codificadas. Avalie cada uma das amostras e coloque seus códigos em ordem crescente de preferência.

Menos Gostou

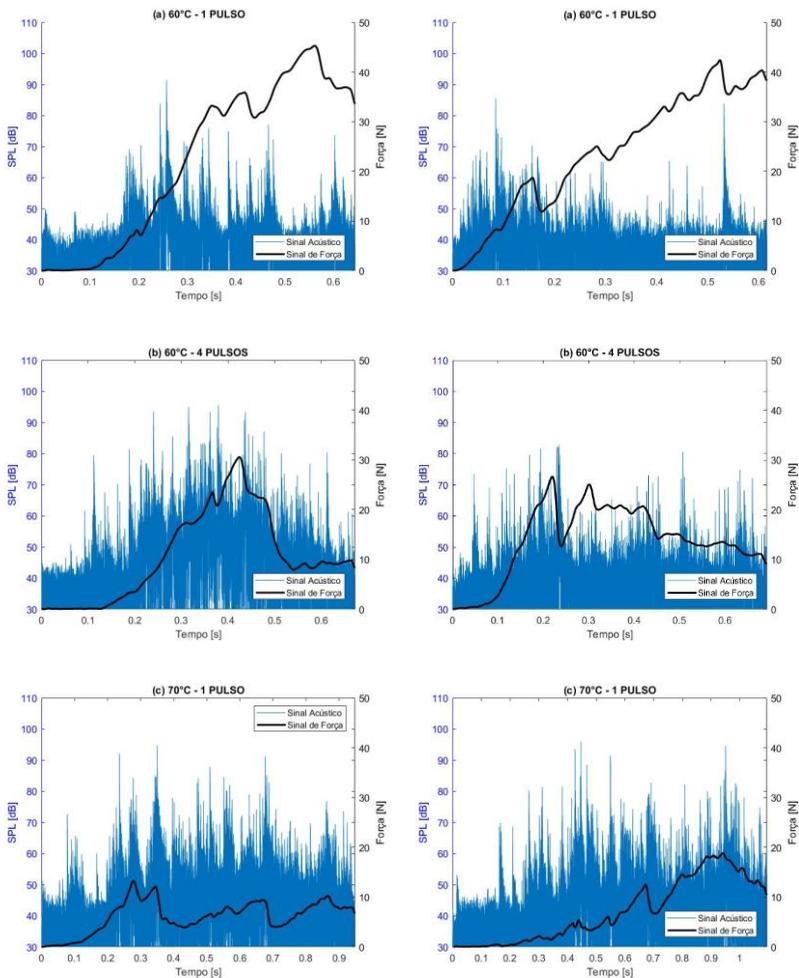
Mais Gostou

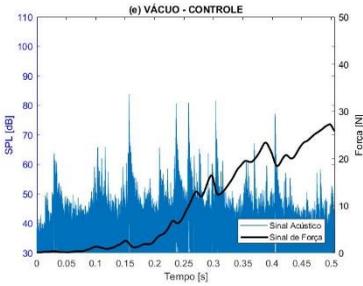
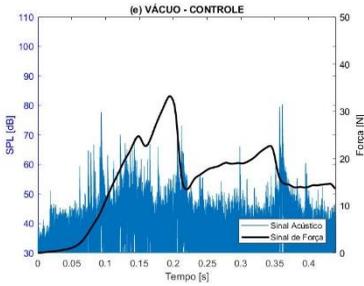
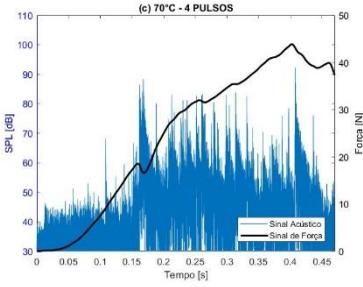
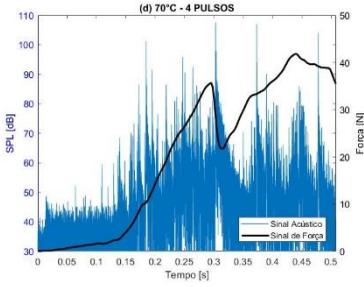
APÊNDICE E – GRÁFICOS DE FORÇA *VERSUS* TEMPO E SPL *VERSUS* TEMPO PARA OS PADRÕES DA ESCALA SPECTRUM



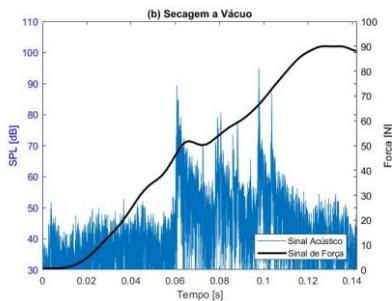
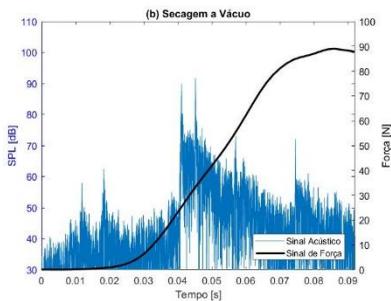
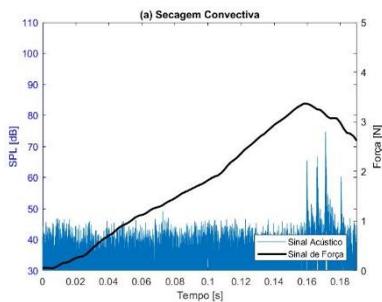
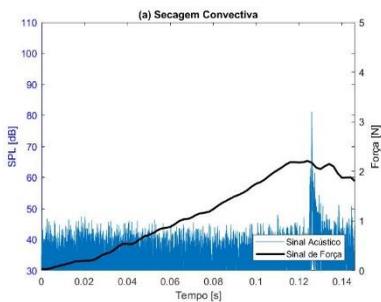


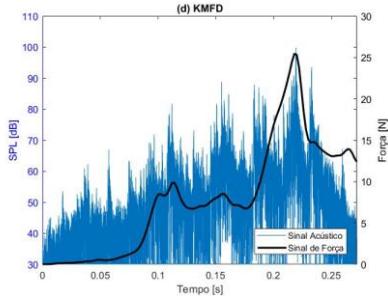
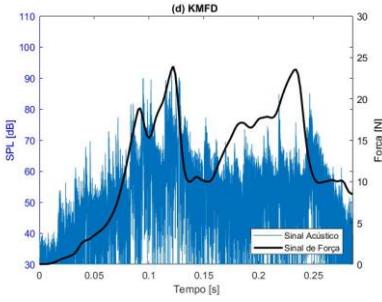
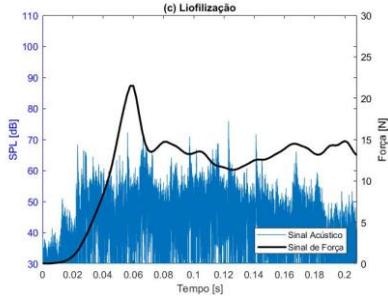
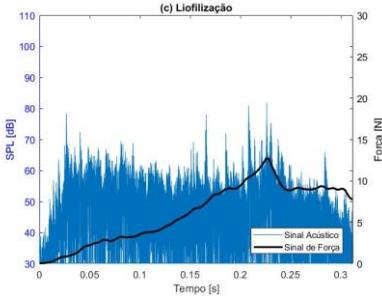
APÊNDICE F – GRÁFICOS DE FORÇA *VERSUS* TEMPO E SPL *VERSUS* TEMPO PARA BANANAS DESIDRATADAS POR KMFD UTILIZANDO DIFERENTES CONDIÇÕES DE PROCESSOS





APÊNDICE G – GRÁFICOS DE FORÇA *VERSUS* TEMPO E SPL *VERSUS* TEMPO PARA BANANAS DESIDRATADAS POR DIFERENTES PROCESSOS





ANEXO A – FICHA PARA TRIAGEM DO PAINEL DESCRITIVO

Triagem do Painel Descritivo de Textura

Coloque um pedaço de cada produto entre os molares, morda uma vez, avalie a dureza. Ordene as amostras da menos dura para a mais dura

Menos Dura

Mais Dura

Coloque um pedaço de cada produto entre os molares, morda uma vez, avalie a crocância. Ordene as amostras da menos crocante para a mais crocante

Menos Crocante

Mais Crocante

Técnica para avaliação da dureza: para sólidos, coloque o alimento entre os molares e morda uniformemente, avaliando a força necessária para comprimir o alimento. Para semissólidos, meça a dureza comprimindo o alimento contra o palato com a língua.

Definição da dureza: a força para atingir uma determinada deformação, como por exemplo:

- Força para comprimir entre os molares
- Força para comprimir entre a língua e o palato
- Força para morder com os incisivos

Técnica para avaliação da crocância: coloque a amostra entre os dentes molares e morda até que o alimento quebre, desintegre, rache ou estilhace.

Definição da crocância: a força e o barulho que ocorrem na quebra ou rachadura do produto quando mastigado com os dentes molares (primeira ou segunda mordida)

Fonte: Meilgaard, Civille e Carr (2007)